

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE TRÊS CÉLULAS COMBUSTÍVEIS DE 200 KW NO BRASIL: 7 ANOS DE EXPERIÊNCIA

C. M. Garcia
M. P. Cantao
P. R. Impinnisi
garcia@lactec.org.br
cantao@lactec.org.br
rodolfo@lactec.org.br

Laboratório de Eletroquímica Aplicada, Dep. de Tecnologia de Materiais, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

Abstract. Neste trabalho será apresentada a experiência de 7 anos de operação e manutenção de e células combustíveis de ácido fosfórico, instaladas em diferentes locais na cidade de Curitiba, estado do Paraná. Uma delas está instalada no centro de processamento de dados da COPEL, a segunda dentro do próprio LACTEC e a terceira no Hospital Erasto Gaertner. Estas células são fabricadas pela United Technologies Co., divisão Fuel Cells, e são do modelo PC25C. Utilizam gás natural como combustível. Possuem três seções principais: o sistema de reforma do gás natural, o sistema de geração de energia elétrica e o sistema que transforma a energia elétrica gerada em corrente contínua em corrente alternada, chamado sistema de condicionamento de energia. Durante este período de operação também foram desenvolvidos diferentes estudos técnicos como análises do balanço energético, eficiência elétrica das plantas e emissões. Também foram analisados outros parâmetros como a utilização do gás natural para geração de energia, avaliações de possíveis usuários destes sistemas de geração, substituição de peças importadas por nacionais, análises econômicas, etc. Conclui-se que é possível a construção de células do tipo PAFC no Brasil como uma forma de desenvolver o mercado.

Keywords: PAFC, operation of PAFC, plant balance

1. INTRODUÇÃO

Existem hoje sendo comercializadas dois tipos de células a combustível, a chamada de ácido fosfórico (PAFC) e as de membrana polimérica (PEMFC). Das células PAFC, na capacidade de aproximadamente 200 kW, existem umas 300 instaladas em todo o mundo, sendo que 3 delas estão operando em Curitiba, estado do Paraná. Uma dessas células a combustível já está em operação desde 2001. As células PEM podem ser compradas com maior facilidade, com grande prazo de entrega, capacidade 5 kW a um custo de aproximadamente R\$ 90.000,00. Isto mostra que ainda existem problemas no caminho da sua ampla comercialização. Da mesma forma, existem barreiras significativas para o estabelecimento de uma economia baseada no hidrogênio. As principais barreiras estão ligadas à dificuldade de montar uma nova infra-estrutura energética de proporções mundiais para distribuição do hidrogênio, aliada à dificuldade de combinar a logística de produção com métodos de armazenagem seguros e economicamente viáveis. A pesquisa e a execução de projetos demonstrativos, utilizando células a combustível, têm um papel crucial na superação destas dificuldades. Atendendo a estes fins, a Companhia Paranaense de Energia – COPEL – e o Instituto de Tecnologia – LACTEC assinaram um convênio de cooperação técnica, em dezembro de 2000, para desenvolver um projeto de pesquisa tecnológico e demonstrativo, utilizando células a combustível e hidrogênio de gás natural reformado. O projeto utilizou 3 plantas de 200 kW cada, do tipo denominado de PAFC, adquiridas da então International Fuel Cells (hoje UTC Fuel Cells). O local de desenvolvimento do projeto foi a cidade de Curitiba, no estado do Paraná, e o início foi em dezembro de 2000. O modelo PC25C foi escolhido e as células foram instaladas. Os locais de instalação foram: o centro de processamento de dados da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, o Instituto de Pesquisas para o Desenvolvimento – LACTEC e o Hospital Erasto Gaertner. Cada célula possui softwares de diagnóstico e operação, assim como de acesso remoto. Os objetivos do projeto incluíram:

(a) Identificar e desenvolver parceria com fornecedor de células a combustível para desenvolvimento do estudo. Devido ao tipo de tecnologia destes sistemas, existe no mundo atualmente um único fornecedor do produto com capacidade de atender as necessidades do projeto (confiabilidade, reconhecimento mundial, disponibilidade, experiência, infra-estrutura para manutenção, etc.). A parceria com este fornecedor/produtor foi indispensável para o êxito do projeto.

(b) Identificar usuários com necessidades diferenciadas de energia, em termos de confiabilidade, qualidade e meio ambiente. Pelas suas características não poluentes, baixo índice de falhas, estrutura modular e alta qualidade da energia fornecida, sistemas a base de células a combustível são indicados para uma série de aplicações. Hospitais, centros financeiros, sistemas de controle de tráfego aéreo e aeroportos, centros administrativos, modernos setores industriais e outros setores da atividade econômica são exemplos de usuários desta tecnologia. Nesta etapa do projeto foram identificados os usuários potenciais e definidas as possibilidades de instalação de uma unidade.

(c) Definição e aquisição do sistema. Definição dos parâmetros gerais da instalação (disponibilidade de gás, tipo de gás, água e outros necessários para o funcionamento destes sistemas), a partir da demanda e das características de cada usuário. O conjunto de 3 (três) células foi instalado no período de 4 (quatro) anos, com uma potência total aproximada de 600 kW.

(d) Instalação de 3 (três) unidades de células a combustível. Esta etapa incluiu o treinamento prévio da equipe LACTEC/COPEL e a montagem da infra-estrutura para transporte, recepção, instalação, operação e manutenção das células. A proposta inicial para instalação das 3 (três) unidades foi: a primeira unidade na COPEL DISTRIBUIÇÃO. A segunda unidade no LACTEC. A terceira unidade no Hospital Erasto Gaertner, próximo ao LACTEC.

(e) Aspectos referentes à legislação. Sendo que um dos objetivos do projeto era implementar uma nova tecnologia de geração de energia, os aspectos legais tiveram uma importância fundamental. Nesta etapa foi definida a estratégia de ação junto aos órgãos que definem as políticas fiscais, levando em consideração as experiências internacionais, os incentivos oferecidos pelo governo dos EUA, OMC (Organização Mundial do Comércio), Banco Mundial, etc., incentivos estes que favorecem a aquisição e desenvolvimento de tecnologias de geração de energia não poluente.

(f) Instalação, monitoramento e controle. Terminada a instalação e iniciada a operação da primeira unidade do sistema, foi executada a monitoração e avaliação da mesma. Nesta etapa foi crucial a definição de procedimentos e técnicas para monitoramento do desempenho, do impacto ambiental e da relação custo/benefício. Parâmetros como rendimento e aproveitamento do calor gerado, número de falhas, emissão de poluentes, tempo de amortização, custos de manutenção e outros foram coletados em períodos predefinidos. Estes dados serão fundamentais para planejar a instalação comercial em larga escala de sistemas de geração distribuída no contexto energético e econômico brasileiro.

2. DESCRIÇÃO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL PC25C

A célula contém três seções principais: a seção de processamento de combustível; a seção de geração de energia; e finalmente a seção de condicionamento de energia. A seguir são descritas as principais características de estas seções.

2.1 Sistema de processamento de combustível

As células a combustível precisam de hidrogênio e oxigênio para operar. Na seção de processamento de combustível, o hidrogênio é extraído através da reforma de gás natural, para alimentar os eletrodos, na seção de geração de energia, onde irão acontecer as reações eletroquímicas que vão gerar a corrente elétrica. A Figura 1 apresenta uma fotografia do reformador de combustível da célula PC25C. A Figura 2 apresenta um esquema representativo da estrutura interna do reformador. Na Figura 2 a entrada com o número 10 é alimentada com uma mistura de vapor de água e gás natural previamente dessulfurizado. Esta mistura percorre a tubulação indicada com o número 7, a qual é mantida a alta temperatura pelos queimadores. A chama dos queimadores e os gases da combustão não entram em contato direto com o gás natural que está sendo reformado.



Figura 1. Fotografia do reformador de combustível da célula PC25C.

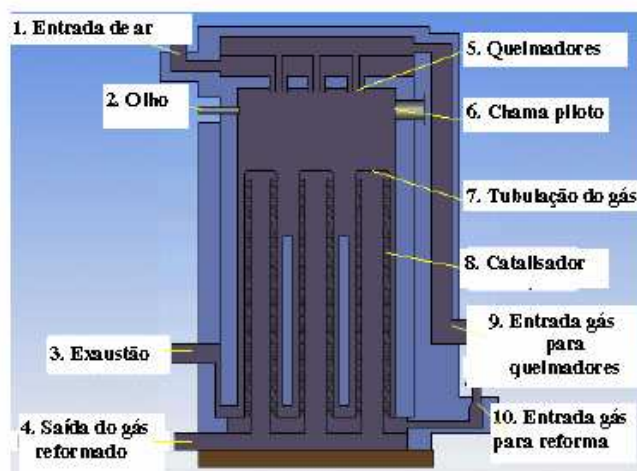


Figura 2. Esquema do reformador a vapor de gás natural da célula PC25C.

2.2 Sistema de geração de energia elétrica

Nesta seção se encontra o componente principal da célula, o conjunto de eletrodos denominado "stack". Os eletrodos (conjunto de células eletroquímicas) estão ligados em série. No caso das células PC25C o eletrólito entre os eletrodos é o ácido fosfórico concentrado.

2.3 Sistema de condicionamento de energia

O principal componente deste sistema é um inversor que transforma corrente contínua em alternada. Mas este sistema também controla a tensão e corrente de saída da célula, ajustando seus valores às necessidades da carga e protege a célula e a própria rede elétrica. Na sua operação, a planta produz 200 kW de energia elétrica útil, mais calor e água que podem ser utilizados para alimentar as necessidades dos usuários. Um módulo de resfriamento acompanha a unidade. Este módulo é montado em separado e serve para eliminar o calor não aproveitado, evitando o sobre aquecimento da planta. A planta opera automaticamente e pode regular sua saída de energia autonomamente aos valores necessários, no modo denominado “grid connected” (conectada à rede). Quando necessário, a planta se desconecta da rede, por exemplo, durante quedas de energia, ou se desliga em casos de mau funcionamento. A Tabela 1 apresenta as características técnicas da planta PC25C na sua configuração padrão.

Tabela 1. Características técnicas da planta PC25C na sua configuração padrão.

Características	Valor
Potência nominal	200 kW/235 kVA
Tensão/Freqüência	480 Volts, 3 fases, 4 fios, 60 Hz
Alimentação de combustível	Gás natural: 10 e 35 cm de coluna H ₂ O
Consumo de combustível	54 m ³ de gás natural; 40% eficiência elétrica referente ao poder calorífico inferior do GN
Nível de ruído	62 dBA a 9 metros de distância
Dimensões da planta	3 x 5,5 x 3 metros
Dimensões do módulo de resfriamento	1,2 x 4,2 x 1,2 metros
Temperatura ambiente de funcionamento	-10°C a +45°C
Energia térmica gerada	700.000 Btu/h a 60°C

Opções e configurações

A planta PC25C está disponível comercialmente, com uma série de acessórios, descritos a seguir: • Trocador de calor de alta temperatura HEX 490 Na configuração standard, a planta PC25C produz 700.000 Btu/h de água quente. Em geral, a temperatura da água é de, aproximadamente, 60°C, mas pode atingir 70°C. Com o acessório HEX 490, a planta fornece aproximadamente 350.000 Btu/h adicionais de água quente pressurizada a 120°C. O calor que não é aproveitado é descartado através dos trocadores de calor externos da planta. Este opcional não foi fornecido às plantas do projeto.

• Operação em regime “grid independent”

A planta PC25C pode ser configurada para operar independentemente da rede. No modo de operação “grid independent” a rede não é necessária, mas é necessário um gerador para dar a partida inicial da célula. No modo “grid independent” a célula responde instantaneamente a variações de carga de até 50% da sua potência nominal, mantendo uma excelente regulação de tensão e freqüência. É possível operar a célula no modo “grid connected” e passar para “grid independent” durante quedas de energia da rede. Neste caso a célula está conectada fisicamente a duas cargas (uma considerada crítica e outra considerada não crítica). Quando há uma queda de energia, o sistema automático desliga a planta da rede e, em 3 a 5 segundos, assume a carga considerada crítica, operando em regime “grid independent”. Esta carga crítica não pode exceder os 200 kW, que é o valor máximo de potência. Para garantir energia ininterrupta e operar como uma UPS é necessária a instalação de uma chave estática para evitar a queda de 3 a 5 segundos.

• Trocador de calor de parede dupla

Nos casos em que a energia térmica da planta é utilizada para aquecer água potável, é necessário instalar um trocador de calor com parede dupla. Este sistema permite a ligação direta das cargas térmicas de consumidor à célula.

- Combustíveis alternativos

A planta PC25C pode ser utilizada para operar com propano. O reformador tem a capacidade de alternar instantaneamente entre propano e gás natural. Outras opções incluem uma unidade de processamento de gás, desenvolvida pela UTC, para utilizar gás de um digestor anaeróbico ou de um aterro sanitário. Devido à diluição do metano nestes gases, é preciso trocar a tubulação de modo a permitir maior fluxo em volume. Ainda assim, a potência da célula diminui consideravelmente. A planta consome 1.900 pés cúbicos standard de gás natural por hora (aproximadamente 55 m³/h). A tubulação de gás deve ser dimensionada para fornecer 85 m³/h para permitir o aumento do consumo de gás com a degradação do stack da célula. A pressão de entrada do gás à célula deve estar entre 10 e 35 cm de coluna de água. Para satisfazer as necessidades da planta o gás natural deve atender os requisitos listados na Tabela 2.

Tabela 2. Características necessárias do gás natural para alimentar a célula.

Componentes do gás natural	Máximo permitido [% volume]
Metano	100
Etano	10
Propano	5
Butano	1,25
Pentano, hexano, etc.	0,5
CO ₂	3
O ₂ (contínuo)	0,2
N ₂ (contínuo)	4,0
Enxofre total	30 (pico máximo) ou 6 (na média) ppmV
Amônia	1 ppmV
Cloretos	0,05 ppmV

2. ESTUDOS REALIZADOS NAS CÉLULAS

As células combustíveis forneceram a oportunidade de realizar diferentes estudos: balanço energético, eficiência elétrica, otimização de operação, emissões, alguns problemas menores como a condutividade da água de recirculação, e estudos de tipo econômico como a utilização de gás natural para geração de energia, possíveis usuários de células a combustível e o problema da geração distribuída. Alguns destes resultados são apresentados neste trabalho.

3.1 Estudo do balanço energético da planta instalada no LACTEC

A unidade PC25C é composta basicamente pelas unidades de produção de hidrogênio, de geração de energia elétrica, de tratamento de água e pelos sistemas de produção de vapor e de refrigeração. A unidade de produção de hidrogênio existe para evitar a sua armazenagem, que requer materiais resistentes às condições críticas de temperatura, pressão e corrosão. Os reatores de hidrodessulfurização, de reforma a vapor e de deslocamento de água são os equipamentos desta unidade. A geração de energia elétrica ocorre no reator eletroquímico de ácido fosfórico através da reação de oxirredução envolvendo o hidrogênio contido no gás de síntese e o oxigênio atmosférico. A energia elétrica gerada neste processo passa por um inversor de corrente, que transforma a corrente contínua (CC), característica do processo eletroquímico, em corrente alternada (CA). Na seqüência, as especificações de tensão e frequência devem ser atendidas para que a energia elétrica produzida pela célula a combustível tenha aplicação prática. O sistema de produção de vapor é composto por um tanque separador, que centraliza as correntes que recuperam o calor de algumas operações do processo. O vapor gerado neste sistema é encaminhado para a unidade de produção de hidrogênio. O calor excedente da unidade PC25C é removido pelo sistema de refrigeração, que tem como fluido refrigerante uma mistura de água e propileno glicol a 30%. A entalpia adquirida pelo fluido refrigerante é destinada à cogeração ou descartada para a atmosfera, através do auxílio de ventiladores.

O sistema operacional da unidade PC25C é formado por dispositivos de acionamento e controle que ajustam automaticamente os parâmetros de operação para atender a uma determinada condição de potência elétrica nominal. Com este sistema a estabilidade de carga é obtida em alguns segundos, porém a estabilidade térmica pode levar horas. O sistema operacional indica a presença de perturbações e falhas através de um alarme de alerta e, em alguns casos emergenciais, desliga automaticamente a unidade PC25C. O acionamento da unidade PC25C, conhecido como start-up, também é controlado por este sistema. Como já foi indicado antes, a unidade PC25C tem três modos distintos de operação, o *grid connected*, o *grid independent* e o *idle*. No modo *grid connected* a unidade opera em paralelo com a concessionária, podendo ser aplicada para diminuir o consumo de energia de uma dada instalação. No modo *grid independent*, a operação se dá de forma independente da rede de distribuição, alimentando um conjunto de cargas definidas a critério do consumidor. O modo *idle* é o modo de espera, onde toda potência elétrica gerada é utilizada para o próprio consumo da unidade, visando manter o aquecimento do sistema. A disposição dos principais equipamentos dentro da cabine metálica pode ser observada através das Figuras 3 e 4, que mostram as partes dianteira e traseira da unidade PC25C, respectivamente.

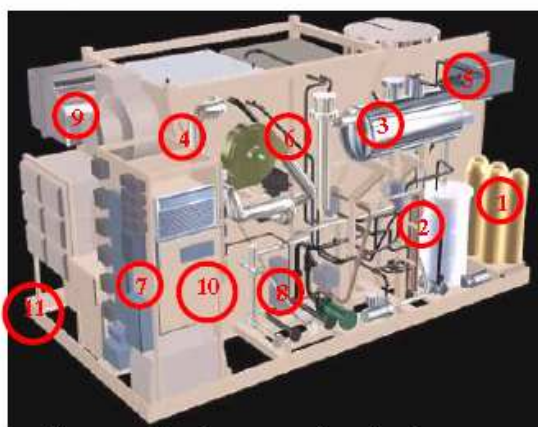


Figura 3. Equipamentos localizados na dianteira da cabine.

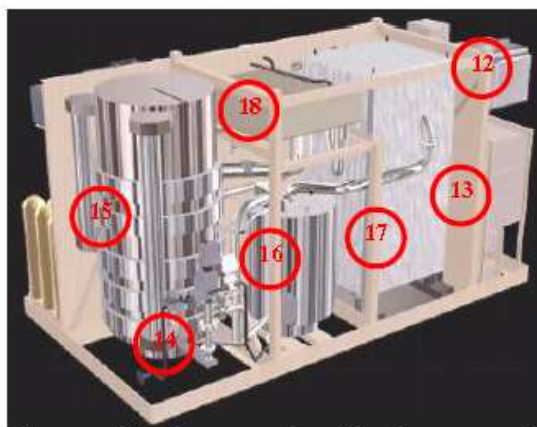


Figura 4. Equipamentos localizados na traseira da cabine.

Principais equipamentos da unidade PC25C indicados nas Figuras 3 e 4: 1:Cilindros de resinas e carvão ativo; 2:Tanque de estocagem de água; 3:Tanque separador; 4:Soprador; 5:Tanque de estocagem de fluido refrigerante; 6:Aquecedor elétrico; 7:Distribuição de energia e controladores; 8:Bomba do sistema de refrigeração; 9:Ventilador do compartimento elétrico; 10:Trocador de calor; 11:Transformadores; 12:Filtro de ar; 13:Condicionador de corrente elétrica; 14:Ejetor de gás natural; 15:Reator de reforma; 16:Reatores de deslocamento e de hidrodessulfurização; 17:Reator eletroquímico – stack; 18:Condensador A partir do desenvolvimento dos balanços de massa e de energia da unidade PC25C pode-se concluir que:

- As vazões de combustível teórica e a experimental, obtida pelo sensor FE-101, apresentam valores semelhantes, indicando que a metodologia empregada no modelo matemático de equilíbrio é capaz de representar o sistema e que as hipóteses consideradas são pertinentes. O maior desvio entre estes parâmetros foi de 9,85%, para uma potência elétrica nominal de 80 kW. Uma alternativa encontrada para diminuir os desvios seria aumentar o tempo de amostragem da aquisição dos dados obtidos pelos sistemas de aquisição de dados I e III;
- A metodologia empregada na determinação da vazão de vapor, através do acompanhamento do nível do tanque separador, mostrou-se eficiente;
- O fato da vazão da corrente de água condensada CP-301 ser maior do que a vazão da corrente de água CP-302, que alimenta o sistema de geração de vapor, para toda a faixa de potência nominal considerada, comprova a auto-suficiência da unidade PC25C em água;
- O perfil do consumo de gás natural, em função da potência elétrica nominal de operação, teve o seu comportamento explicado com base no consumo de energia elétrica do aquecedor elétrico AE-301;

- A eficiência total da unidade se manteve praticamente constante para toda faixa de potência elétrica nominal avaliada. O maior aproveitamento do combustível na geração de energia elétrica útil é evidenciado na potência nominal de operação de 140 kW. Nesta condição, as eficiências elétricas determinadas com base nos poderes caloríficos superior e inferior são de e 30,37 e 33,62%, respectivamente;
- A faixa de potência elétrica nominal compreendida entre 0 e 100 kW apresenta baixa eficiência devido ao elevado consumo de energia elétrica por parte do aquecedor elétrico AE-301;
- A eficiência elétrica da unidade nas baixas potências elétricas nominais pode ser melhorada através do ajuste da vazão de fluido refrigerante.

3.2 Estudo da eficiência elétrica das plantas instaladas no LACTEC e COPEL

Existem várias maneiras possíveis de mensurar a performance da Célula a Combustível. Neste estudo optou-se determinar as eficiências elétricas das plantas localizadas no LACTEC e no Pólo KM3. Para isto, as células foram selecionadas para operar em Grid Conected nas seguintes potências: 10 kW, 50 kW, 100 kW e 150 kW. Ambas operaram simultaneamente nas potências determinadas, estando desta maneira expostas as mesmas condições de temperatura. Tal fato permitiu a comparação dos dados de eficiência elétrica obtidos. Durante a realização das medidas não foi constatada nenhuma anomalia da rede de distribuição elétrica como, por exemplo, interrupção no fornecimento de energia ou grande variação da tensão. Tal fato fez com que as células não sofressem nenhuma parada de operação de longa duração que comprometessem os dados coletados. Células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica e calor. Em uma célula a combustível o processo de conversão da energia química em energia elétrica é direto. Tal fato é uma das principais diferenças deste tipo de tecnologia para os sistemas convencionais, nos quais ocorre por primeiro a transformação da energia química em calor através da combustão e então a conversão do calor em energia elétrica com o auxílio de algum tipo de ciclo de força (motores de combustão interna ou turbinas alimentadas com gás a alta pressão) acoplado a um gerador. Esta capacidade de utilizar um menor número de estágios na transformação energia permite às células a combustível atingir altos níveis de eficiência. Nos sistemas tradicionais de geração de energia apenas 30% a 40% da energia total do combustível é convertida em energia elétrica. O restante é em grande parte transferido na forma de calor para o meio ambiente, não sendo assim possível a sua utilização. Os sistemas que possuem dispositivos de co-geração evitam que grande parcela da energia do combustível seja perdida. Em geral, um adicional de 30% a 40% da energia do combustível pode ser utilizado. As células a combustível podem atingir níveis de eficiência de até 80%. Isto quer dizer que cerca de 40% da energia contida no combustível é transformada em eletricidade e os outros 40% são transformados em calor passível de utilização. Entretanto, a energia produzida por uma célula não é totalmente disponibilizada para consumo. Parte da energia elétrica gerada é consumida pelos próprios subsistemas da célula (processamento do combustível; condicionamento da energia – inversor; sistemas de suprimento de água e ar). Desta forma, a quantidade de energia elétrica disponível para o consumo não é exatamente igual a 40% da energia fornecida à célula. Para determinar-se a quantidade de energia consumida pelos subsistemas da célula a combustível, ou seja, a quantidade de energia gasta pela célula apenas para o seu consumo próprio, as mesmas foram selecionadas para operar em IDLE. Neste modo de operação a célula não fornece nenhuma quantidade de energia para consumo externo. Entretanto, a planta produz toda a energia utilizada para manter o funcionamento de todas as suas válvulas, bombas e outros dispositivos. Os dados de consumo de energia da própria célula são extremamente relevantes na análise dos dados de eficiência em baixas potências. Isto ocorre porque em baixas potências, o consumo de gás da célula diminui em comparação ao consumo em potências mais elevadas (potências iguais a 100 kW ou mais). Sendo assim, a parcela de gás consumida para a manutenção dos sistemas da célula é mais expressiva em relação ao consumo total de gás. Este fato explica a drástica diminuição da eficiência elétrica a baixas potências. Os cálculos da eficiência elétrica e térmica da célula são bastante simples.

Executando-se um balanço global de energia é possível chegar à seguinte relação:

$$\text{Energia Química do Combustível} = \text{Energia Elétrica Gerada} + \text{Calor Rejeitado}$$

$$\text{Explicitamente: } \text{PCI} \cdot \text{Q} = \text{Potência Programada} + w \cdot C_p \cdot \Delta T$$

onde: PCI é o Poder Calorífico Inferior do Gás Natural em kcal/m³, Q o consumo de gás natural em m³/h, w é a vazão mássica do fluido refrigerante kg/h, CP é o calor específico do fluido refrigerante kJ/(kg.K), e DT a variação de temperatura da água. Para a realização do cálculo da energia química contida no Gás Natural foram utilizados os dados de consumo de gás indicado pelo programa de comando da célula (Power Plant Operations). Foi também utilizado neste cálculo o poder calorífico inferior do Gás Natural 8.560 kcal/m³ porque a água produzida na reação nos Stacks se encontra vaporizada. Caso a água produzida estivesse na fase líquida, seria possível utilizar uma maior quantidade de energia da reação e então seria usado o poder calorífico superior na execução dos cálculos. O valor da energia elétrica gerada foi pré-fixado no comando de operação da planta. O cálculo do calor rejeitado é feito utilizando-se os valores da temperatura de saída e entrada do fluido refrigerante e vazão mássica do mesmo. Estes valores são obtidos e armazenados no programa de acompanhamento dos parâmetros da célula (software Marrari). Ao contrário dos dados da vazão de gás, todos os outros parâmetros armazenados neste software são confiáveis. Também foi obtido o valor do calor específico da solução de propileno glicol em água (fluido refrigerante). O valor utilizado para uma solução contendo 30% em volume de propileno glicol a uma temperatura de 40°C foi de

$$C_p = 3,903 \text{ kJ/kg(K)}$$

Valores Obtidos

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos, de consumo e geração, em distintos regimes de funcionamento, para as plantas instaladas no LACTEC e na Copel. Tabela 4. Valores de consumo e geração para a planta instalada no LACTEC, em distintos regimes de funcionamento.

Tabela 4. Valores de consumo e geração para a planta instalada no LACTEC, em distintos regimes de funcionamento.

	IDLE	10 kW	50 kW	100 kW	150 kW
Consumo de Gás Natural / m ³ /h	19,4134	19,2448	26,0314	25,927	40,21581
Energia Gerada / kW.h	-	240	1200	4800	3600
Eficiência Elétrica	-	0,0523	0,1932	0,3881	0,3753

Tabela 5. Valores de consumo e geração para a planta instalada na Copel, em distintos regimes de funcionamento.

	IDLE	10 kW	50 kW	100 kW	150 kW
Consumo de Gás Natural / m ³ /h	18,3257	19,7652	23,8444	27,439	41,63756
Energia Gerada / kW.h	-	240	1200	4800	3600
Eficiência Elétrica	-	0,0509	0,2110	0,3667	0,3625

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados da relação entre a potência gerada e o consumo de gás para as células do LACTEC e Copel e a relação entre a eficiência e a potência para as mesmas células.

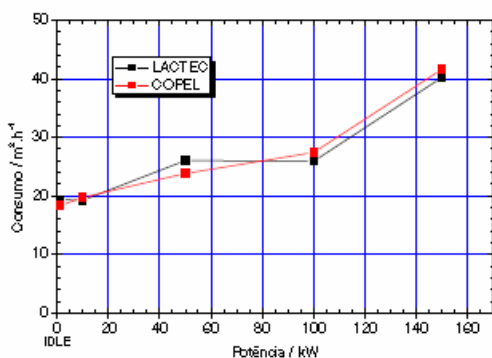


Figura 5. Relação entre a potência gerada e o consumo de gás para as células do LACTEC e da Copel.

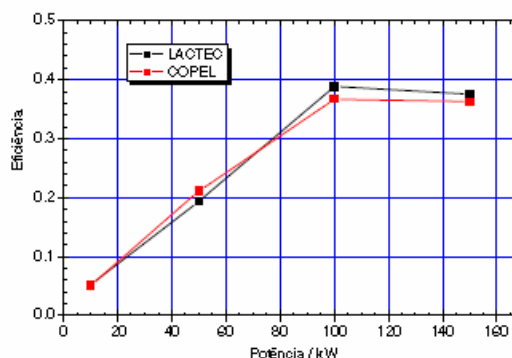


Figura 6. Relação entre a eficiência e a potência para as células do LACTEC e da Copel.

ESTUDO DE NACIONALIZAÇÃO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As plantas instaladas no LACTEC, COPEL KM3 e Hospital Erasto Gaertner foram fabricadas pela UTC Fuel Cells, com forte apoio do governo americano. Ainda assim, o preço das plantas não carrega o subsídio aplicado, mas corresponde aos custos reais de produção. As razões para o alto custo da planta e para que o preço não tenha caído ao longo dos anos são basicamente duas: a baixa produção, que impede a diluição dos custos fixos de fabricação, e o alto custo das peças fornecidas por outros fabricantes. O estudo de nacionalização foi realizado para identificar a possibilidade de uso de peças nacionais e a possibilidade de produção destas plantas no Brasil. O objetivo deste estudo foi o de fornecer subsídios para instituições brasileiras decidirem pela oportunidade de produção de plantas de células a combustível de ácido fosfórico no Brasil. Substituição de peças fornecidas pela UTC Fuel Cells Ao longo do desenvolvimento do projeto, várias peças foram substituídas devido a falhas irreversíveis ou pela perda de desempenho. A importação de peças fornecidas pela UTC se mostrou muito cara, e a equipe buscou peças de fornecedores nacionais como alternativas. Há dois tipos de peças que podem substituir as peças originais: as peças nacionais e as peças importadas por representantes no país. As peças nacionais são muito mais baratas que as peças originais, mas não há como garantir o mesmo desempenho e em alguns casos não foi possível encontrar peças similares. As peças originais podem ser adquiridas de representantes no país, quando possível. Neste caso, o mesmo produto foi adquirido a um custo também menor que o preço da UTC. Apenas em casos muito raros a peça importada não substituiu adequadamente a peça original. Um destes casos foi o de uma válvula (CV500) que, após ser substituída por uma nacional, apresentou falha reiteradamente. Isto se deveu a que a UTC Fuel Cells possui um contrato de fornecimento com o fabricante, e que obriga a um tratamento especial da superfície interna da válvula. Entretanto, o modelo e a especificação não são alterados, levando à falha da peça adquirida no mercado local. As plantas foram adquiridas com um conjunto de peças sobressalentes completo. Após a operação e manutenção das plantas durante o projeto, várias destas peças sobressalentes foram utilizadas, sendo logo verificado quais peças poderiam ser substituídas por nacionais equivalentes ou por peças de representantes do fabricante original, e quais peças só poderiam ser fornecidas pela UTC. A análise dos custos UTC e das peças substituíveis levou às seguintes conclusões:

- Peças nacionais e/ou de representante custam em média 46% a menos que as peças originais.

- Uma estimativa conservadora indica que 32% das peças, em valor, podem ser substituídas. Esta estimativa não leva em conta o stack e a eletrônica de potência e controle. Com estes dados chega-se a um valor de US\$ 3,560 o kW instalado, ou seja, uma redução de 17% do custo total da planta. Um item muito importante que foi substituído foram as resinas aniônicas e catiônicas para tratamento da água. Estas resinas originalmente eram do tipo denominado grau nuclear conseguidas unicamente através de importação da UTC. Atualmente as resinas utilizadas, da mesma empresa que fornece as resinas de grau nuclear, são de um nível de qualidade inferior, mas que se encontram no mercado local e apresentaram até o momento um desempenho satisfatório.

Outro item importante substituído foram todos os filtros de troca trimestral. Este conjunto de filtros, que deve ser trocado trimestralmente, foi substituído por filtros similares desenvolvidos nacionalmente a partir dos originais, a um custo mais de 10 vezes inferior. Tanto as resinas como os filtros são itens de troca trimestral, representando uma parcela importante das despesas anuais para manutenção das células. O último item de despesa (além do gás natural) contínuo das células é o nitrogênio. A especificação inicial do nitrogênio era Nitrogênio 4.8. Atualmente nas células é utilizado o 4.6, e foram iniciados alguns testes para tentar utilizar nitrogênio comercial, o qual após passar por filtros adequados poderia atingir o nível desejado de pureza. Estes testes não foram concluídos e ficaram suspensos para serem continuados posteriormente. Fabricação de células PAFC no Brasil A redução de custo pela substituição de peças indica que as plantas poderiam ter um preço bem mais em conta caso fossem fabricadas no Brasil. A mão de obra mais barata e a eliminação de custos de importação já seriam suficientes para a determinação de preços finais menores. Além disso, a UTC Fuel Cells trabalha com similar americano, ou seja, apenas as peças que não são fabricadas nos EUA são usadas na PC25C, o que contribui para elevação do custo. O Brasil possui conhecimento de células a combustível de ácido fosfórico. O grupo de eletroquímica da USP São Carlos trabalhou com esta tecnologia nos anos 90 e abandonou devido à solução da maioria dos problemas tecnológicos. As empresas de eletrônica de potência no Brasil não trabalham com potências acima de 50 kW, menos por dificuldades tecnológicas que de mercado. O próprio LACTEC pode desenvolver sistema de conversão de potência na faixa de 200 kW, desde que haja interesse de alguma empresa para investir nesta atividade. A construção de células PAFC no Brasil não só é possível como é desejável. A viabilidade técnica das plantas foi demonstrada e a tecnologia apresentou vantagens interessantes, como o menor custo de operação e a durabilidade. Sistemas com preço adequado seriam bastante competitivos no mercado de geradores e teriam mercado suficiente para a manutenção do negócio. Por outro lado, o fornecimento de equipamentos viáveis na faixa de 200 kW atrairia a atenção dos investidores para os sistemas menores, baseados na tecnologia PEMFC. Assim, mesmo sem a mesma maturidade tecnológica, haveria oportunidade de negócios para uma tecnologia adequada a um número maior de aplicações.

CONCLUSÃO

O presente projeto demonstrou a aplicação de células a combustível de ácido fosfórico de 200 kW durante 7 anos. As plantas testadas continuam operando nos seus locais de instalação. A equipe executora adquiriu uma vasta experiência nos processos de instalação, start-up, operação e principalmente manutenção destas unidades. Com esta experiência, a equipe do projeto pode subsidiar desenvolvedores de tecnologia e usuários com informações que vão desde aspectos relacionados à engenharia até os relativos ao desempenho e avaliação destas plantas. A tecnologia de células a combustível oferece uma forma eficiente e não poluente de gerar energia elétrica e neste projeto ficou provado que esta tecnologia tem benefícios claros que vão ao encontro das novas necessidades da sociedade. O sucesso das aplicações documentadas neste estudo indica que as células a combustível de ácido fosfórico podem exercer um papel estratégico em futuros sistemas descentralizados.