



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/11
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO-XIV

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO - GET

ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

José Geraldo de Melo Furtado (*)
CEPEL

Fernando Rodrigues da Silva Junior
CEPEL

Francisco da Costa Lopes
CEPEL

RESUMO

Sistemas de geração de energia com células a combustível têm sido enfatizados para aplicações no âmbito da geração distribuída de energia elétrica em função das crescentes necessidades de incremento da eficiência energética e da redução dos impactos ambientais. Este trabalho apresenta os principais resultados acerca de uma análise energética, operacional e econômica de um sistema de geração distribuída de energia elétrica de 5 kW baseado em células a combustível, pioneiro no âmbito do setor elétrico nacional, reportando resultados de desempenho elétrico-energético do período 2004-2012, os quais permitiram identificar os principais parâmetros que condicionam o comportamento desses sistemas de geração.

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência Energética, Células a Combustível, Geração Distribuída, Cogeração, Gás Natural

1.0 - INTRODUÇÃO

O atual cenário energético mundial é caracterizado pela predominância do uso dos combustíveis fósseis como recurso energético primário (REP) tanto da matriz energética quanto da matriz elétrica (via geração térmica) (1). Ainda que no caso do Brasil, a matriz elétrica seja caracterizada pela forte presença da energia elétrica de origem hidráulica, nos últimos anos o sistema elétrico nacional vem gradativamente adquirindo um caráter misto, hidrotérmico, em virtude, principalmente, da intensificação das condições hidrológicas desfavoráveis (2). Entrementes, o agravamento dos problemas ambientais, especialmente do aquecimento global, tem resultado em ações que procuram restringir as emissões de poluentes causadores de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). Considerando-se que mudanças estruturais no sistema energético mundial tendem a ser lentas, a otimização da geração de energia (e, em especial de energia elétrica) de forma a se disponibilizar maior quantidade de energia por unidade de massa de carbono emitida (incrementar a razão energia/carbono) se torna uma iniciativa fundamental dos sistemas e processos de geração de energia. Em outras palavras, a busca por eficiência energética é uma constante em todo o mundo e tem sido considerada o principal tópico para investimentos e atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) no setor elétrico-energético. De fato, no âmbito da geração de energia elétrica, pequenos incrementos em eficiência energética podem resultar em grande aumento da economicidade e significativa redução relativa das emissões (3).

O caminho da eficiência energética não envolve apenas a geração de energia elétrica (EE), mas também as etapas de transmissão, de distribuição, além de seus usos e aplicações. Especificamente na geração térmica (base da matriz elétrica mundial) os REP empregados são essencialmente combustíveis hidrocarbônicos (carvão, petróleo e gás natural) e as principais ações estão relacionadas à maximização do aproveitamento energético desses combustíveis fósseis, por meio de geração com elevada eficiência e concomitante redução de emissões (1, 3).

(*) Avenida Horácio Macedo, n° 354 – sala 121 – DTE – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6069 – Fax: (+55 21) 2280-3537 – Email: furtado@cepel.br

Paralelamente, a partir dos anos 2000, a Geração Distribuída (GD) de energia elétrica tem ganhado importância no cenário elétrico-energético mundial, permitindo reduzir a necessidade de expansão da geração centralizada, economizando recursos, reduzindo perdas e podendo agregar tecnologias mais eficientes de geração (3, 4).

Nesse cenário, sistemas de geração de energia com células a combustível (CaC) têm sido considerados, principalmente, para aplicações no âmbito da GD e em sistemas de cogeração (CHP, *Combined Heat and Power*), uma vez que as células a combustível são, potencialmente, os mais eficientes geradores de energia elétrica conhecidos e têm apresentado contínua redução de custos e grande capacidade de minimização de emissões de poluentes causadores do efeito estufa (4, 5). Dessa forma, diversas unidades e sistemas de geração estacionária de energia elétrica à base de CaC (com potências desde 0,5 kW até superiores a 1 MW) têm sido instalados em diferentes mercados, notadamente no Japão, Estados Unidos, Coreia do Sul e na Europa (6).

No Brasil, as iniciativas de projetos de demonstração e, mais ainda, de aplicações comerciais de sistemas de células a combustível são ainda poucas, mas as CaC têm conseguido atenção para aplicações estratégicas e que exigem altas eficiências e confiabilidade, bem como elevada qualidade da EE gerada. Nesse cenário, o presente trabalho apresenta uma análise energética, operacional e econômica de um sistema de geração distribuída de energia elétrica com células a combustível, focada na avaliação de eficiência energética para otimização do sistema e na análise acerca da possibilidade de aproveitamento do rejeito térmico do sistema de geração elétrica. O sistema de cogeração de energia baseado em células a combustível analisado foi pioneiro no âmbito do setor elétrico brasileiro e, operando de 2004 a 2012, proporcionou diversos resultados originais que permitiram o desenvolvimento de métodos teóricos e empíricos para avaliação técnica e econômica de CaC.

2.0 - EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

2.1 O Sistema de Geração Distribuída com Células a Combustível (GD-CaC-5kW)

O sistema de GD de energia elétrica com CaC (Figura 1(a)) foi constituído no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), em laboratório próprio, sendo formado por uma CaC de baixa temperatura de operação, do tipo membrana polimérica trocadora de prótons (PEMFC, do inglês *proton exchange membrane fuel cell*), com potência elétrica nominal de 5 kW (Figuras 1(a) e 1(b)) associada a um reformador de gás natural (GN) para a produção local de hidrogênio (Figura 1(a)). Um subsistema de eletrônica de potência e controle (ElePot) (Figuras 1(a), 1(d) e 1(e)) e um deionizador para fornecimento de água de processo (para a reforma a vapor) complementam os subsistemas supracitados, formando assim o sistema GD-CaC-5kW (Figura 1). Uma completa descrição deste sistema pode ser obtida em trabalhos anteriores (4, 7, 8) e, essencialmente, a unidade PEMFC é constituída por um empilhamento de noventa CaC unitárias (Figuras 1(b) e 1(c)) e um conjunto de subsistemas auxiliares de processo, de monitoramento e de controle (Figura 1(b)), que visam assegurar o estabelecimento das condições adequadas para o funcionamento da PEMFC, principalmente no que diz respeito às condições de umidificação dos gases reagentes e do eletrólito polimérico, bem como ao gerenciamento térmico e hídrico do empilhamento (auxiliado pelos equipamentos para controle de ar e de temperatura, Figuras 1(f), 1(g) e 1(h)), as quais são aspectos fundamentais para a tecnologia PEMFC (9).

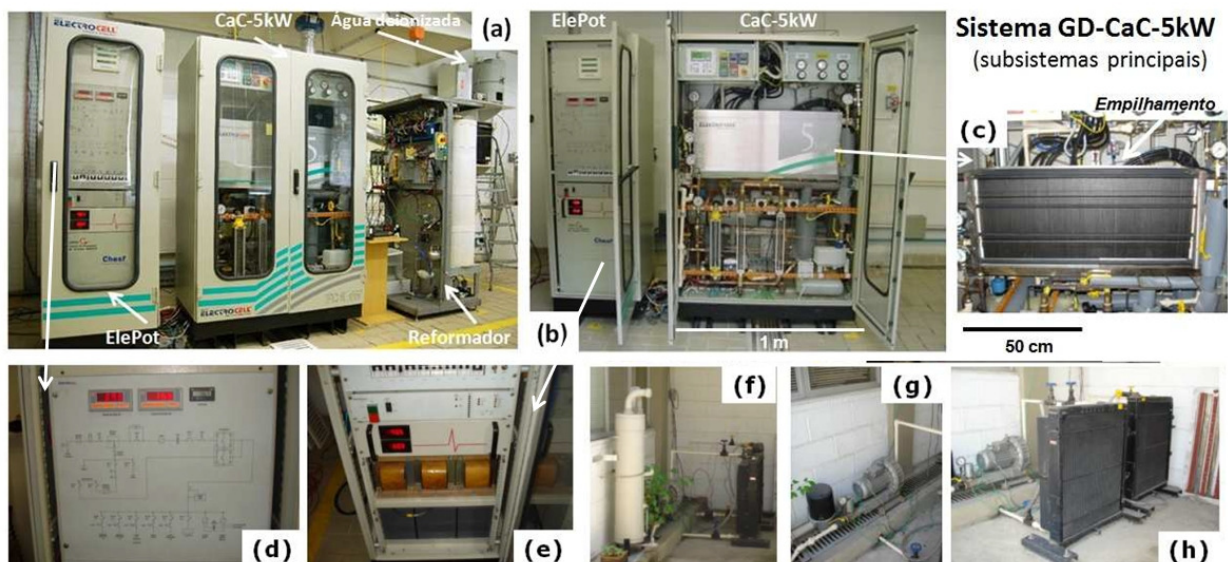


FIGURA 1 – (a) Visão do sistema GD-CaC-5kW formado pela unidade PEMFC e pelo reformador de GN; (b) gabinetes abertos da CaC (direita) e do sistema de condicionamento de potência - ElePot (esquerda); (c) empilhamento de 90 CaC unitárias; (d) e (e) fluxograma elétrico e detalhes do sistema de condicionamento de potência e banco de baterias; (f) filtro-coluna de ar (esquerda) e trocadores de calor externos; (g) soprador de ar para a PEMFC; (h) detalhes dos trocadores de calor da PEMFC e do reformador de GN.

2.2 Métodos de Caracterização e Análises

Todos os dados de tensão (potencial de operação, U), corrente elétrica (I) e potência elétrica (P), utilizados neste trabalho, foram obtidos diretamente do sistema de monitoramento da unidade PEMFC (e validados por medições independentes de U e I), sob condições estáveis de operação em regime estacionário, mediante a permanência mínima de um minuto, do sistema GD em cada condição de potencial e corrente estudada, e através do acoplamento de uma carga elétrica que foi empregada para simular a condição de um hipotético consumidor. Os resultados de potência térmica (PT) foram obtidos a partir de medições de temperatura da água do sistema de arrefecimento do conjunto de geração (incluindo o rejeito térmico do reformador de GN) e supondo-se perdas da ordem de 25% nos respectivos sistemas de transferência térmica, principalmente em função da baixa qualidade termodinâmica do rejeito térmico no caso considerado (por se tratar de uma CaC de baixa temperatura de operação) (4, 9). A caracterização do reformador foi baseada na determinação das vazões mássicas dos fluxos relevantes (GN, hidrogênio e água) a partir de medições em fluxômetros mássicos acoplados ao sistema de geração, bem como da composição química do reformado obtida por cromatografia em fase gasosa. Todos os resultados subseqüentes são valores médios e as barras de erro foram utilizadas (quando foi o caso, em função da escala adotada) para representar a variação do parâmetro considerado em relação ao seu respectivo valor médio (média aritmética).

Os resultados de análises econômicas são baseados na atualização de estudos de viabilidade técnico-econômica e de progressão das tecnologias de CaC (4, 7) efetuados a partir do comportamento energético do sistema GD-CaC-5kW e têm por base a determinação do custo da energia elétrica gerada (CoE, em US\$/MWh) em sistemas de CaC e de suas parcelas constitutivas relacionadas ao investimento fixo, à manutenção e operação (O&M) e ao combustível empregado, conforme a Equação (1).

$$\text{CoE (US\$/MWh)} = 3,6 \frac{P_{\text{Comb}} \text{ (US\$/GJ)}}{\eta_{\text{Tot}}} + 10^3 \cdot \text{CO \& M (US\$/kWh)} + \frac{\text{FA(j, n)}}{8,76 \cdot F_{\text{CAP}}} \cdot \text{CaC}_{\text{IF}} \text{ (US\$/kW)} \quad (1)$$

onde P_{Comb} é o preço do combustível utilizado, CO&M é o custo de operação e manutenção do sistema GD, FA(j,n) é o fator de anualização do investimento, F_{CAP} é o fator de capacidade (sendo a relação entre a energia efetivamente gerada em um ano (8760h), em MWh, e a energia máxima que poderia ser gerada se a CaC operasse 8760 h/ano na sua potência nominal), CaC_{IF} é o investimento (em US\$/kW) referente à aquisição e instalação do sistema GD-CaC-5kW e η_{Tot} é a eficiência energética total do sistema GD.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta um histórico com os principais resultados acerca do desempenho elétrico do sistema GD-CaC-5kW, em termos das curvas anuais médias características do período de 2004 a 2012. Nota-se a ocorrência de dois conjuntos de curvas: as de 2004 a 2008, com desempenhos I x U (Figura 2(a)) e I x P (Figura 2(b)) muito próximos, e as curvas de 2009 a 2012, que se apresentam de forma mais diferenciada. As curvas deste último conjunto evidenciam a degenerescência do desempenho do sistema GD-CaC-5kW em relação às características de projeto representadas essencialmente pelas curvas do primeiro conjunto. De fato, conforme pode ser visto na Figura 2(b), sob as mesmas condições operacionais, somente as curvas do período 2004-2008 alcançam a potência elétrica nominal (5 kW) do sistema de geração. Os resultados (curvas I x U e I x P) de 2011 se mostram melhores do que os de 2009 e 2010 (estes muito próximos entre si) pelo fato de que uma revisão do sistema, incluindo a substituição de duas CaC unitárias então danificadas, foi efetuada no final de 2010. Dessa forma, foi conseguido um ganho relativo em termos de desempenho operacional, ainda que não tenha sido suficiente para retornar aos resultados elétrico-energéticos do período 2004-2008.

Os gráficos da Figura 2 destacam o intervalo de corrente elétrica 86,00-106,00 A no qual as curvas atingem as maiores potências, que no caso da melhor curva indica 54,020 V e 96,20 A, ano 2005 (Figura 2(a)). Também, como observado na Figura 2, a esse intervalo de I correspondem o consumo de 24,24-27,57 litros/min de GN no reformador com a respectiva produção de 56,21-64,19 litros/min de H_2 , o qual é consumido na PEMFC. No ponto de máxima potência esses valores são, respectivamente, 26,24 litros/min de GN e 60,92 litros/min de hidrogênio.

Com base na série histórica de desempenho elétrico-energético do sistema GD-CaC-5kW, conforme mostrado na Figura 2, foi possível selecionar os pontos de melhores condições de potencial para cada ponto ou nível de corrente elétrica solicitada pela carga (consumidor); ou seja, os maiores potenciais, os quais se traduzem em maiores eficiências para a CaC (9). Dessa forma, foram determinadas as curvas I x U e I x P representativas da real melhor condição operacional (MCOp) – ótima/pico e média – do sistema GD em questão, as quais são mostradas na Figura 3(a), indicando as curvas ótimas (com símbolos cheios) e a melhor condição média (com símbolos vazados). As diferenças entre estas são, em geral, bem pequenas, cerca de 2% para o intervalo de I até 86,0 A e 3,5% para toda a faixa avaliada. O gráfico mostrado no detalhe (reduzido) da Figura 3(a) indica que a discrepância relativa de potencial (ΔU) realmente só ultrapassa a casa dos 2% a cerca de 90,0 A. Conforme observado no gráfico da Figura 3(b) é na real melhor condição média que o sistema atinge a potência nominal de projeto (5 kW), já que na curva ótima (situações de pico) chega-se a 5,2 kW.

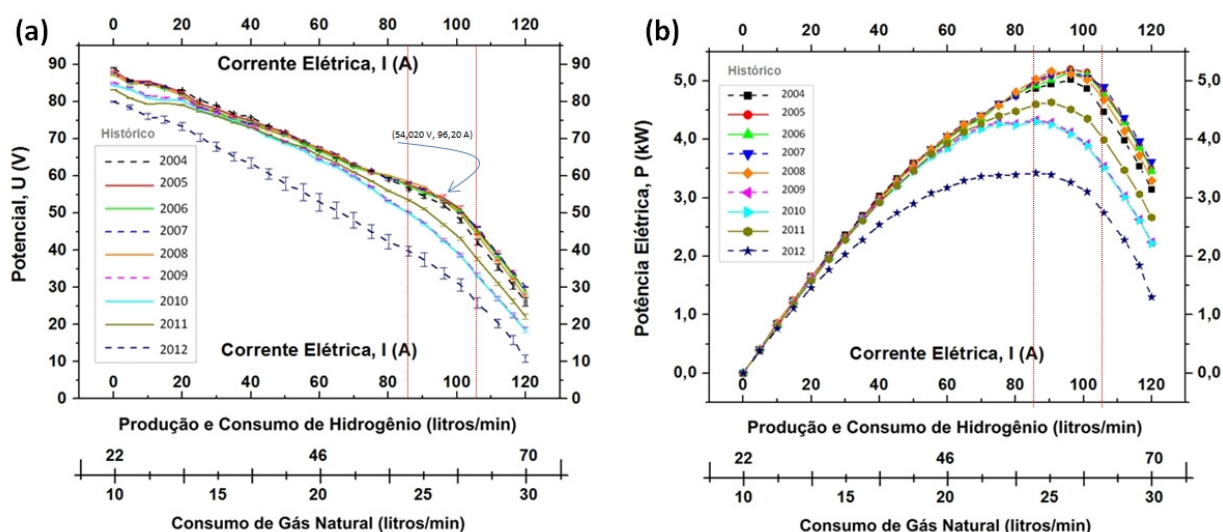


Figura 2 – Curvas características do desempenho elétrico-energético médio do sistema GD-CaC-5kW instalado no CEPEL ao longo do período 2004-2012: (a) Curvas de polarização ($U \times I$); (b) Curvas de potência elétrica (P) versus corrente elétrica (I). Em destaque (entre as linhas vermelhas paralelas) estão as regiões $U \times I$ e $P \times I$ representativas das vizinhanças da potência nominal de operação (5 kW).

Considerando-se que para um sistema estacionário, em geral, o foco principal está em operar nas vizinhanças da potência nominal (4), a Figura 3(b) mostra de forma ampliada a região correspondente à corrente elétrica (demandada pelo consumidor/carga) igual a 86,00-106,00 A, apresentando as curvas de potencial e de potência elétrica (na melhor condição média e na condição ótima), bem como a curva típica de disponibilidade de potência térmica (com sua faixa de variação). As regiões internas (hachuradas) definidas nas curvas $I \times U$ e $I \times P$ (entre as respectivas curvas com símbolos preenchidos e vazados) definem as típicas regiões de operação do sistema GD-CaC-5kW em condições reais.

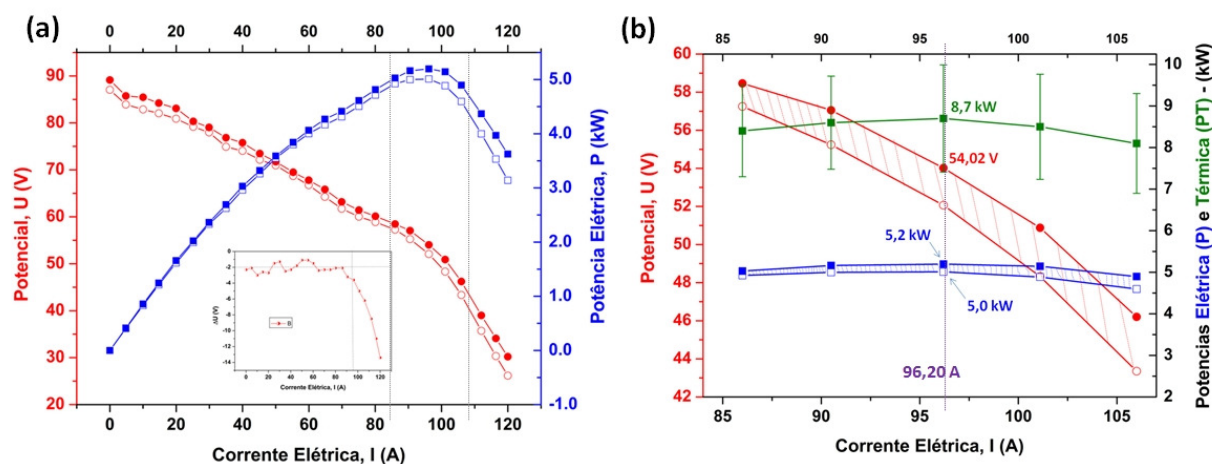


Figura 3 – (a) Curvas ($I \times U$ e $I \times P$) representativas da melhor condição operacional (MCOp) do sistema GD-CaC-5kW instalado no CEPEL; (b) Parcelas das curvas $I \times U$ e $I \times P$ mostradas em (a) nas faixas de potencial e corrente elétrica nas vizinhanças da potência elétrica nominal (5,0 kW), indicando também a faixa típica de disponibilidade de potência térmica (PT) do sistema de geração GD-CaC-5kW nas condições consideradas.

A Figura 4 apresenta as curvas de eficiência do sistema GD-CaC-5kW ao longo do período 2004-2012 em relação a duas bases: Na Figura 4(a) tem-se a eficiência operacional (EfOp) do sistema em relação ao desempenho característico da MCOp média e na Figura 4(b) tem-se a eficiência voltaica (EfU) da PEMFC em relação ao potencial teórico da formação de água a partir de H_2 e O_2 puros numa célula eletroquímica. Estes resultados corroboram aqueles apresentados nas Figuras 2 e 3, indicando que nas condições em que o sistema de geração é mais solicitado do ponto de vista energético (aproximadamente de 90 a 120 A) os comportamentos de eficiência (tanto EfOp quanto EfU) se mostram bem diferenciados. Assim como na Figura 2, é também interessante notar que, nas vizinhanças da potência nominal, os melhores desempenhos foram obtidos em 2005 e em 2007 (excetuando-se, evidentemente, as curvas características de MCOp), portanto, não necessariamente no início (primeiro ano) de operação do sistema. A partir dos resultados apresentados na Figura 4 verifica-se que o sistema GD-CaC-5kW apresenta eficiência voltaica típica de 38,0-40,5% na faixa de potência em torno de 5 kW. Além disso, nota-se que a eficiência operacional se mantém próxima à condição ótima para as curvas até 2008.

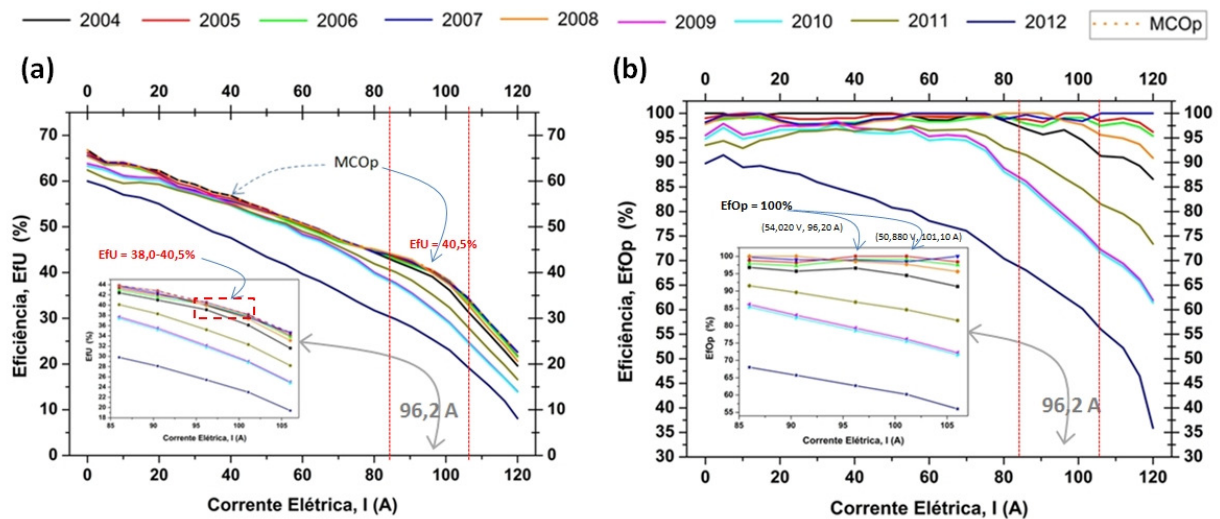


Figura 4 – Curvas de eficiência do sistema GD-CaC-5kW instalado no CEPEL: (a) Eficiências voltaicas (ou de potencial) características do sistema estudado; (b) Eficiências típicas em relação ao desempenho do sistema operando na melhor condição operacional (MCOp) média. Nos respectivos detalhes encontram-se as curvas na região vizinha (também destacadas nos gráficos) da potência elétrica nominal (cf. Figura 2(b)).

De fato, os resultados apresentados na Figura 5(a) mostram os níveis de EfU característicos dos dois pontos de corrente elétrica associados às máximas potências elétricas do sistema de geração. Tanto em 90,5 A quanto em 96,2 A os valores de EfU são muito próximos quando se considera o período 2004-2008 (média igual a 41,7%), mas existe considerável discrepância quando se considera o período 2009-2012 (média 32,7%) – uma diferença da ordem de 22% entre estas duas médias. A média dos valores de EfU correspondente à média MCOp para os dois níveis de corrente (42,8% e 40,5%, média 41,7%) é exatamente igual ao valor médio do período 2004-2008, mostrando que as curvas de desempenho da MCOp podem ser tomadas como característica do comportamento do sistema GD-CaC-5kW em seus cinco primeiros anos de vida útil. Na prática, sendo também o que se espera de um sistema GD com PEMFC para aplicações estacionárias (4, 7, 9). Além disso, é importante notar que, para este período, os valores de eficiência obtidos são bastante bons quanto comparados aos tipicamente considerados na literatura para sistemas PEMFC (em geral, 40%) (4, 9).

Como a eficiência de um sistema de geração é bastante sensível à questão da alimentação do combustível (insumo energético), a Figura 5(b) mostra o comportamento da eficiência voltaica do sistema avaliado em função do fator de utilização do combustível (μ) (ou do seu recíproco, o coeficiente estequiométrico (λ)) que indica a quantidade de combustível em excesso). Na Figura 5(b) estão também indicadas as curvas teórica (para uma CaC operando com gases puros e sob condições normais – 1 atm e 25°C) e típica de sistemas PEMFC (mostrando eficiência igual a 40% quando $\lambda = 100\%$ ou $\mu = 1$) (14). Com base nos resultados desta figura se verifica que tanto a curva para MCOp quanto aquela do período 2004-2008 (em vermelho) são levemente superiores à curva tipicamente considerada para PEMFC (evidenciando um bom projeto e condições operacionais adequadas), ao passo que a curva característica do período 2009-2012 (em magenta) já se mostra significativamente inferior ao longo de toda a faixa de μ , em função das condições e problemas operacionais já considerados neste trabalho.

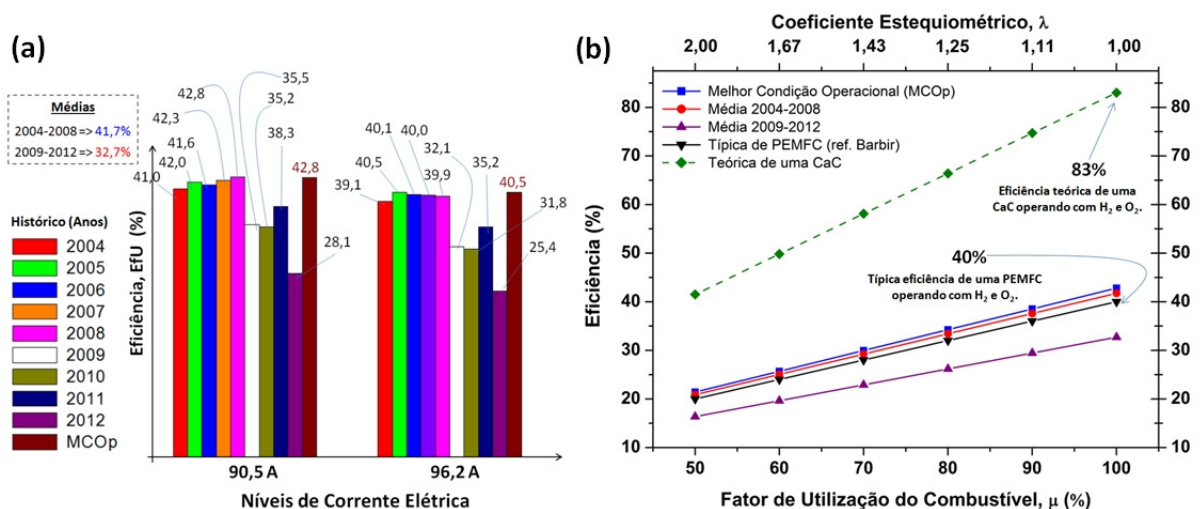


Figura 5 – (a) Níveis de eficiência (voltaica) característicos do sistema GD-CaC-5kW instalado no CEPEL de 2004 a 2012, indicando ainda as médias em dois períodos característicos e as eficiências associadas à MCOp;

(b) Curvas de eficiência em função do fator de utilização do combustível (m) e do coeficiente estequiométrico (l) para o sistema avaliado, comparativamente as curvas teórica de uma CaC e operacional típica (PEMFC).

É também importante notar o grande impacto que o fator de utilização do combustível pode ocasionar sobre o desempenho energético-econômico de sistemas de geração do tipo avaliado. Com efeito, conforme pode ser visto na Figura 5(b), com \square da ordem de 80% a eficiência teórica já corresponde a 65% e a eficiência para o sistema GD-CaC avaliado estaria compreendida entre 24 e 33%. Do ponto de vista econômico significaria operar com um excesso de combustível da ordem de 25%, sem gerar a correspondente energia. Essa observação, mais uma vez evidencia a importância da otimização das condições operacionais, pois, na prática, para um dado sistema em funcionamento, é dessa forma que se consegue uma curva de eficiência com a maior aproximação (em azul na Fig. 5(b)) em relação à curva teórica das células a combustível.

O sistema avaliado tem como combustível primário o GN, sendo este convertido em hidrogênio no reformador, o qual tem sido considerado o combustível de transição para a Economia do Hidrogênio (4, 10) em função de sua elevada razão H/C e da grande infraestrutura disponível em escala global. Assim, a eficiência do processo de geração de hidrogênio também passa a ser um ponto fundamental para a viabilização do sistema de geração de energia com CaC. A Figura 6(a) apresenta os resultados acerca do desempenho do reformador de GN, onde o parâmetro "Grau de Utilização do Reformador (%)" refere-se a que percentagem da sua capacidade nominal de produção de hidrogênio ele está efetivamente operando. Em função deste parâmetro tem-se a eficiência energética do equipamento, determinada com base no poder calorífico inferior dos respectivos gases, e a eficiência de conversão (GN/H₂) no reator, relacionada à razão molar H₂/GN. Nota-se que nas proximidades da capacidade nominal de operação do reformador ocorre um pequeno decréscimo na eficiência (conforme visto na curva de eficiência energética do reformador), que, ao longo de toda a faixa, variou de 54,2 a 64,2% atingindo, nos testes realizados, um máximo de 64,9% entre 80 e 90% da capacidade nominal de operação. O pico de produção de hidrogênio pelo reformador de GN foi de 4,9 g/min (61,6 l/min), correspondendo a um consumo global de 18,1 g/min (26,4 l/min) de GN, dos quais cerca de 14 g/min (77,3%) efetivamente alimentado ao reator de reforma (pois o restante é utilizado no queimador do equipamento), o que corresponde a uma taxa de produção de hidrogênio cerca de 22% inferior àquela da produção teórica. A cerca de 50% da capacidade de produção do reformador, esta discrepância é da ordem de 18%. No ponto de máxima produção de hidrogênio a razão molar H₂/GN é da ordem de 2,92-2,94. Dessa forma, em relação à literatura, a produção de hidrogênio no sistema avaliado apresentou valores de eficiência bastante compatíveis com as aplicações em pequenas escala (4, 9, 11).

De forma complementar, a Figura 6(b) mostra a composição química do reformado, em termos das três principais impurezas (CO₂, CO e CH₄). Nota-se que ao longo de toda a faixa de utilização do equipamento os níveis de monóxido de carbono (CO) são bastante baixos e compatíveis com o uso do hidrogênio em PEMFC (3). O mesmo ocorre com o dióxido de carbono (CO₂), embora sua variabilidade seja consideravelmente maior, mas, ainda assim, menor do que a do metano, principalmente nos extremos da faixa de operação. No intervalo de maior eficiência energética do reformador (50-90%) a concentração de metano no reformado é cerca de 30% menor que nos demais pontos de operação, evidenciando também as melhores condições para conversão reacional neste intervalo.

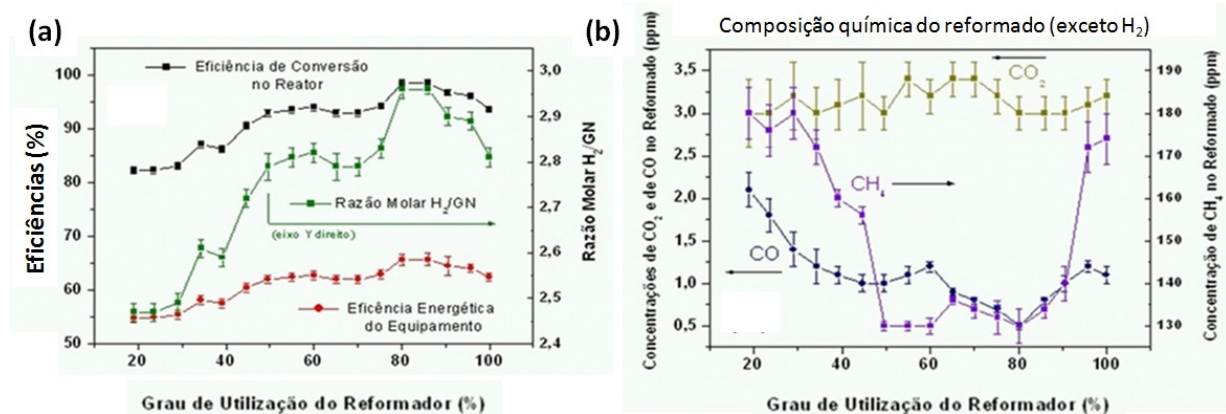


Figura 6 – Curvas de desempenho características do reformador de GN em função do grau de utilização do equipamento (nível percentual de utilização em relação a sua capacidade nominal de produção): (a) Eficiência energética e de conversão; (b) composição química do reformado (teores de impurezas: CO₂, CO e CH₄).

Os resultados experimentais acerca do histórico de operação, desempenho e eficiência do sistema GD-CaC-5kW podem ser utilizados como base para uma análise operacional-econômica desse tipo de sistema de geração. A Figura 7 mostra as possibilidades de operação do sistema GD-CaC-5kW ao longo de um dia típico. O sistema pode operar acompanhando carga (Perfil 1) suprindo totalmente a potência/energia demandada pelo consumidor/carga, pode atender ao consumidor a maior parte do tempo, mas não nas situações de pico, no caso acima de 5 kW (Perfil 2), ou pode operar o tempo todo na potência nominal (totalizando, no caso, 120,00 kWh/dia), sempre

atendendo a apenas uma parcela da potência/energia demandada (Perfil 3). Em estudos anteriores (4) identificou-se o caso do Perfil 3 como uma aplicação (estacionária) mais eficiente do sistema considerado. De fato, conforme já observado, operando na potência nominal o sistema também disponibiliza uma potência térmica (também representada na Figura 7), a qual foi identificada na Figura 3(b) como da ordem de $(8,7 \pm 1,1)$ kW a uma temperatura típica de 38-45°C (no caso avaliado). Levando-se em consideração essa situação operacional, a Figura 8 apresenta os resultados de uma avaliação econômica para um sistema do tipo GD-CaC-5kW, tendo o caso base definido por: $\text{CaC}_{\text{IF}} = 2.000$ US\$/kW, $P_{\text{Comb}} = 15,00$ US\$/GJ, $\text{CO\&M} = 0,01$ US\$/kWh, $\eta_{\text{Tot}} = 30,0\%$, $F_{\text{CAP}} = 100\%$, num empreendimento de cinco anos a uma taxa de juros igual 15,0% a.a.

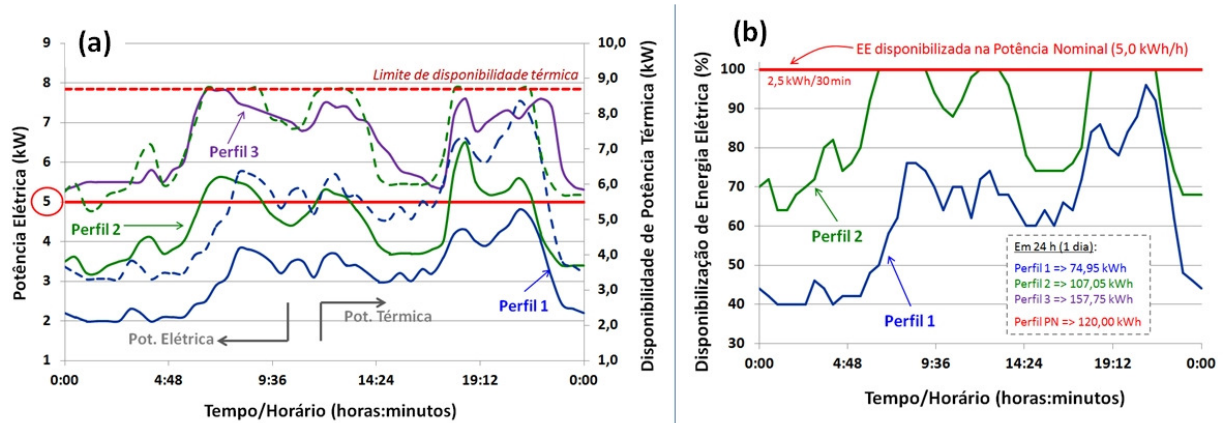


Figura 7 – (a) Perfis de potência (carga) elétrica e térmica; (b) Perfis de energia elétrica gerada pelo sistema GD-CaC-5kW.

Os resultados da Figura 8 permitem considerar que o custo do combustível é o parâmetro que apresentou o maior impacto sobre o CoE, uma vez que tanto o menor valor de CoE (138,11 US\$/MWh) quanto o maior (678,11 US\$/MWh) foram obtidos em função do P_{Comb} igual a, respectivamente, 5,00 e 50,00 US\$/GJ. Em seguida, sobressaem-se o fator de capacidade e a eficiência do sistema. O primeiro evidencia claramente o impacto da ociosidade do sistema de geração sobre o CoE (notadamente quando o F_{CAP} é inferior a 60%), ao passo que o segundo mostra que mesmo para um sistema de geração que já apresenta boa eficiência no caso base, pequenos incrementos podem proporcionar significativa redução do CoE; no caso avaliado um incremento de 1% em eficiência pode representar até 5% de redução do CoE. F_{CAP} e CaC_{IF} estão associados à mesma parcela de custo que compõe o CoE e, idealmente, deve-se minimizar o CaC_{IF} e maximizar o F_{CAP} ; neste caso, atuando, p. ex., tipicamente segundo o atendimento (parcial) ao Perfil 3 da Figura 7. Esta última situação está relacionada à configuração e aplicação do sistema (mas, também sofre impacto do custo do combustível), sendo mais facilmente alcançável quando comparada à redução do CaC_{IF} , o qual, por sua vez, depende da estrutura dos mercados, bem como de ações governamentais (4, 10, 11). Já o impacto do CO&M sobre o CoE é bem menor, mas traduz a necessidade de tais sistemas de geração não serem intensivos em cuidados e manutenção.

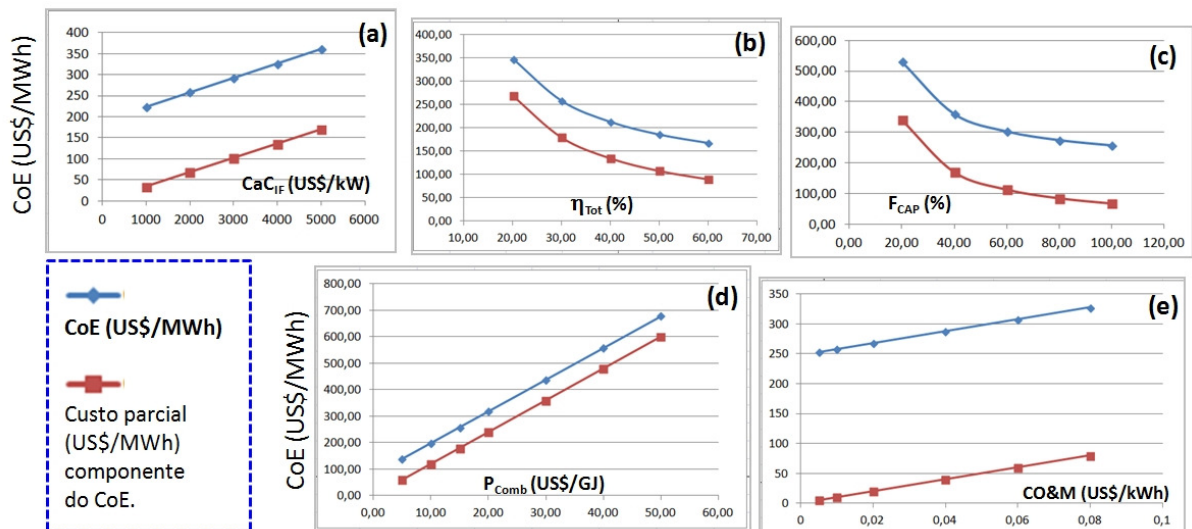


Figura 8 – Resultados de análises econômicas com base no desempenho elétrico-energético do sistema GD-CaC-5kW – Custo da energia elétrica gerada (CoE) em função do: (a) Investimento fixo, (b) Eficiência do sistema, (c) Fator de capacidade, (d) Custo do combustível, (e) Custo de operação e manutenção.

Os resultados de uma análise econômica permitem delinear ações ou iniciativas que possam minimizar o CoE, atuando principalmente, no caso do presente estudo, sobre os cinco principais parâmetros considerados nos resultados da Figura 8. Um dos aspectos importantes consiste em aproveitar o rejeito térmico do sistema (atuando então como cogeração/CHP), pois isso incrementa a eficiência energética global do sistema via melhor aproveitamento do insumo energético. Quando isto for praticado num cenário de incentivos ou bônus sobre os preços do sistema (CaC_{IF}) e/ou do combustível (P_{Comb}), os quais têm sido comuns nos primeiros mercados relevantes para as tecnologias de CaC, os ganhos em termos de redução do CoE podem ser ainda mais significativos. Tal é o que ocorre, p. ex., no Japão, mediante os incentivos governamentais para o Programa Ene-Farm que permitiu a instalação de mais de sessenta mil sistemas CHP-PEMFC desde 2005 (12).

De fato, para os parâmetros do caso-base considerado neste trabalho, o CoE seria igual a 258,11 US\$/MWh (0,2581 US\$/kWh) e, em função das influências dos parâmetros considerados nos resultados da Figura 8, estaria compreendido entre 0,1381 e 0,6781 US\$/kWh, uma faixa de variação de 391%. Então, para o insumo energético (GN) cotado a 0,054 US\$/kWh (caso-base) tem-se o CoE 4,78 vezes maior. Valores atuais (fevereiro de 2015), sem impostos, da EE da rede em algumas concessionárias brasileiras estão entre 0,12 e 0,15 US\$/kWh, em sistemas isolados este valor chega a 0,24-0,32 US\$/kWh e quando se considera a EE oriunda das termelétricas nacionais mais antigas tem-se até 0,27-0,30 US\$/kWh (13-15). Dessa forma, realmente num cenário de incentivos à redução de emissões e incremento em eficiência energética os sistemas do tipo GD-CaC podem vir a se constituir em importantes alternativas tecnológicas (3, 4, 10, 13).

4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os principais resultados e análises de eficiência energético-econômica decorrentes de um projeto de demonstração do Cepel acerca de sistemas de geração distribuída de energia elétrica com células a combustível ao longo do período que foi de 2004 até 2012. O valor máximo de eficiência energética alcançado foi de 42,8%, com média ligeiramente superior a 40,0%, e as melhores condições operacionais permitiram atingir potências elétrica total e térmica respectivamente iguais a 5,2 kW e 8,7 kW (a cerca de 38-45°C); apresentando ainda potenciais por célula a combustível unitária da ordem de 0,60 V ou superior ao longo de toda a faixa de potência da célula a combustível testada.

O reformador de gás natural que compõe o sistema de geração, permitindo a produção local de hidrogênio, apresentou a máxima taxa de produção de hidrogênio igual a 4,9 g/min, correspondendo a um consumo de 18,1 g/min de gás natural, mostrando que a máxima eficiência deste equipamento é obtida em vazões elevadas, entre 80 e 90% da vazão nominal de produção de hidrogênio com elevado grau de pureza. Adicionalmente, a análise econômica permitiu identificar que o custo do combustível primário é o principal parâmetro que afeta o custo da energia elétrica gerada, o qual pode ser reduzido mediante o aproveitamento do rejeito térmico do sistema de geração. A eficiência do sistema e o fator de capacidade são também importantes fatores para a viabilização do emprego de sistemas de geração como o avaliado nos mercados de geração distribuída.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) World Energy Council. World Energy Resources, Londres, 2013.
- (2) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional, Rio de Janeiro, 2014.
- (3) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Eficiência Energética e Geração Distribuída, Nota Técnica DEA 26/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (4) SERRA; E. T., FURTADO; J. G. M., SOARES; G. F. W., CODECEIRA NETO; A. Células a Combustível: Uma Alternativa para Geração de Energia e sua Inserção no Mercado Brasileiro. 1a ed. Rio de Janeiro: CRESESB/CEPEL, 2005.
- (5) SILVA, C. H. F. (Coord.), Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig. Belo Horizonte, Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, 2012.
- (6) CARTER, D., WING, J., Fuel Cell Today Industry Review 2013, Royston, UK, 2013.
- (7) FURTADO, J. G. M., GATTI, G. C., SERRA, E. T., ALMEIDA, S. C. A., Performance analysis of a 5 kW PEMFC with a natural gas reformer, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 9990-9995, 2010.
- (8) FURTADO, J. G. M., SERRA, E. T., CODECEIRA NETO; A. Desenvolvimento e Avaliação do Projeto de Demonstração do CEPEL de um Sistema de Geração Distribuída de Energia Elétrica com Células a Combustível, Revista EletroEvolução, n. 69, pp. 47-55, dezembro de 2012.

- (9) BARBIR, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press, 2005.
- (10) CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Hidrogênio energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Série Documentos Técnicos, Brasília, 2010.
- (11) IPHE - International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, 2012 Hydrogen and Fuel Cell Global Commercialization & Development Update, 2013.
- (12) KASUH, T., Why does Japan believe in domestic fuel cell? Adaptation to European market? European Gas Technology Conference, 2013.
- (13) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Estudos da demanda de energia - 2050, Nota Técnica DEA 13/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (14) RAMOS, C. O futuro da energia no Brasil é renovável. Jornal O Estado de São Paulo, pp. A2 e B3, 6 de fevereiro de 2015.
- (15) ANEEL. Informações Técnicas – Tarifas, <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Geraldo de Melo Furtado

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 29 de março de 1969.

Doutorado (2005) e Mestrado (2001) em Ciência e Engenharia de Materiais: COPPE/UFRJ. Graduação (1997) em Engenharia Química: UFRJ.

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2002.

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais (DTE), atuando nas áreas de materiais e sistemas energéticos, modelagem e simulação de processos de cogeração, eletroquímica, sistemas de armazenamento de energia e ciências térmicas.



Fernando Rodrigues da Silva Junior

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 20 de novembro de 1961.

Mestrado (2007) em Ciência e Engenharia de Materiais: COPPE/UFRJ. Graduação (1985) em Engenharia Industrial Elétrica: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ.

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 1986.

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais (DTE), atuando nas áreas de eficiência energética, sistemas e equipamentos elétricos, caracterização elétrica de materiais.



Francisco da Costa Lopes

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 26 de outubro de 1976.

Doutorado (2013) e Mestrado (2006) em Engenharia Elétrica: COPPE/UFRJ. Graduação (2003) em Engenharia Eletrônica: UFRJ.

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2006.

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais (DTE), atuando nas áreas de células a combustível, sistemas de geração distribuída, eletrônica de potência e sistemas de armazenamento de energia.