AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Desenvolvimento e Demonstração de Funcionamento de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica, com Tecnologia Nacional, composto por um Módulo de Células a Combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido.

Roque Machado de Senna

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

**Orientador:
Dr. Marcelo Linardi**

São Paulo

2012

AGRADECIMENTOS

"Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós." *Antonie de Saint-Exupéry*.

Como pude constatar, agradecer não é uma tarefa fácil ou justa, mas mesmo assim gostaria de agradecer por esses vários anos de convivência, e experiências valiosas, onde me envolvi para cumprir as atividades do Doutorado no IPEN.

À minha mãe, Maria da Penha Machado de Senna, e ao meu pai, Bernardino Turíbio de Senna, pelos ensinamentos e o apoio.

À minha esposa, Maria Márcia Lima Caldas, meus filhos, Breno, Carol, Vitória e Lucas, minha irmã Lígia, pela paciência, companheirismo e, o apoio incondicional.

Ao Dr. Marcelo Linardi, meu orientador, pela sua dedicação, compromisso e paciência.

Ao Dr. Douglas, sobrinho Henrique, irmã Rosa, Dr. Edgar, irmão Robinson, irmão André, Dra. Fátima, Professor Alfredo Alvim, Dr. Estevan, Dr. Almir, companheiro Sandro Skoda, Dr. Ivan, Dra. Elizabety Santiago, Dr. Fábio Coral, Dr. Vanderley, Dr. Wagner Oliveira, Jamil e sec. Eliana Godói, pela participação permanente e dedicada na discussão dos problemas, suas soluções, bem como no bate-papo, sem maiores compromissos.

Também aos Fernando Moreira e Dra. Rosimeire, pelas inestimáveis contribuições.

Aos professores Doutores: Lourenço Matakas, Rodolfo Politano, Afonso Aquino, Alberto Todo, Carlos Sartori, Martha Vieira, pelas lições aprendidas.

Aos familiares: Sueli, Carlos, Miguel, João Milton e Mary Senna, pelo apoio.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para essa experiência riquíssima, bem como, na construção desta Tese de Doutorado.

Desenvolvimento e Demonstração de Funcionamento de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica, com Tecnologia Nacional, composto por um Módulo de Células a Combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido.

Roque Machado de Senna

RESUMO

Este trabalho apresenta a contribuição obtida no desenvolvimento de um Gerador de Eletricidade Híbrido (HYBRIDGEN), com tecnologia nacional, focado nos sistemas de terceira geração de energia elétrica híbrido, composto por um módulo de células a combustível tipo PEMFC, associado a um acumulador chumbo ácido. Mostra-se também a sua capacidade de operar em modo contínuo, carga com demanda variável e fator de carga inferior a 50%. Foram abordados quatro temas principais. O primeiro refere-se a um estudo para a melhoria da eficácia na conversão de energia em corrente contínua (cc), ao regular o potencial de saída do conversor cc-cc. A energia é proveniente do módulo de célula a combustível de 1 kW_e, equipado com sistema térmico de refrigeração e sistema de alimentação de gases, aqui denominados MCC1. Para tal, foi construído o modelo matemático do sistema conversor de corrente contínua (sistema conversor cc-cc), com solução suportada em equações diferenciais algébricas, ensaios no MCC1, bem como em simulação computacional no programa MATLAB7®. O segundo tema refere-se ao desenvolvimento do projeto e montagem do protótipo do HYBRIDGEN devido à inexistência no mercado brasileiro de um equipamento com as características necessárias tanto para a pesquisa, quanto para uso comercial. Desenvolveu-se uma placa controladora para o acumulador (PCC), os esquemas elétricos, os barramentos e o sistema de relés. Também foi utilizado o MCC1 em desenvolvimento pelo IPEN e ELECTROCELL® com tecnologia 100% nacional. O HYBRIDGEN foi instalado em um sistema móvel. O terceiro tema refere-se à análise de estabilidade do modelo matemático do sistema conversor cc-cc. Utilizou-se de quatro testes de estabilidade, sendo: 1 - pela Resposta em Frequência ao utilizar o Teorema do Mapeamento, de Nyquist; 2 - Lugar das Raízes, de Nyquist; 3 - função de teste Degrau, em pontos de operação e, 4 - função de teste Impulso, em pontos de operação. Por fim, apresentaram-se os resultados dos ensaios de potencial e corrente de uma célula a combustível unitária de 25 cm², do MCC1, e do HYBRIDGEN. No desenvolvimento dos primeiros testes o MCC1 atingiu 704,55 W_e, (potência considerada condição predominante de operação). A seguir, demonstrou-se a capacidade do HYBRIDGEN para simultaneamente: alimentar cargas em corrente contínua; carregar o acumulador de 45 Ah; alimentar o inversor de 2 kW_e e o autotransformador, para fornecer energia a equipamentos em 12V_{cc}, 127 V_{ac} e 220V_{ac}, 60 Hz, todos num total de 819,52 W_e. Esses resultados foram obtidos mesmo com limitações na refrigeração ventilada do MCC1, observadas no decorrer dos testes. Assim, o HYBRIDGEN se mostrou viável tecnicamente, e com grande potencial de uso.

Palavras-chave: Célula a combustível e hidrogênio. Propulsão veicular híbrida. Eficiência de geração elétrica híbrida.

HYBRID SYSTEM DEVELOPMENT AND OPERATION FOR AN ELECTRIC POWER GENERATION WITH THE BRAZILIAN TECHNOLOGY COMPOSED OF A PEMFC FUEL CELL STACK AND LEAD ACID BATTERY.

Roque Machado de Senna

ABSTRACT

This work presents the contribution obtained by the development of the Hybrid Electric Power Generation System (HYBRIDGEN), with Brazilian technology, focused on third generation hybrid system, composed of the fuel cell type PEMFC, associated with a lead acid battery, and shows its variable load demand continuous mode operate ability with load factor below 50%. Four main themes were addressed. The first refers to a study concerning the to direct current (DC) energy converting efficiency improvement to regulate the dc-dc converter output potential. Power comes from the 1 kW_e fuel cell stack, equipped with thermal cooling system and gas supply system, here named MCC1. After that a dc-dc converter system mathematical model was built supported on differential algebraic equations solution, the MCC1 trials, as well as in MATLAB7[®] program computer simulation. The second theme concerns the HYBRIDGEN prototype project and assembly due to lack on equipment on the Brazilian market with the necessary features for both research and for commercial use. Then, a charge controller card (CCC), wiring diagrams, copper bus and relay system were developed. A MCC1 developed by IPEN and ELECTROCELL[®] with Brazilian technology was use. The HYBRIDGEN can be installed in a mobile system. The third refers to a study concerning the stability analysis of the dc-dc converter system mathematical model. Four stability tests were addressed, namely: 1- The Frequency Response was used the Nyquist Mapping Theorem, 2 - The Nyquist Root Locus , 3 - The Step Test Function on operating points, and 4 - The Impulse Test Function on operating points. Finally, experiments with a 25 cm² fuel cell unit, the MCC1 module and the HYBRIDGEN were carried out to, potential and current results. In the first MCC1 tests delivered a power output of 704.55 W (considered dominant operation power). Then, it was demonstrated the HYBRIDGEN ability to 819.52 W_e supply power, simultaneously: direct current loads, charge a 45Ah battery, a 2 kW_e inverter and the autotransformer to supply power 12 V_{cc}, 127V_{ac}, 220V_{ac}, 60 Hz equipment. These results were achieved despite the MCC1 limit in the cooling system observed during the tests. Then, the HYBRIDGEN could be demonstrated technically feasible, and leading to great potential uses.

Keywords: Fuel cell and hydrogen. Hybrid vehicle propulsion. Hybrid electric power generation efficiency.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	08
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.1 Objetivos Específicos	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Células a combustível tipo PEMFC	13
3.2 Acumulador de energia chumbo ácido	24
3.3 Sistemas híbridos	29
3.4 Sistemas de controle	34
4 METODOLOGIA	39
4.1 Módulo de Célula PEMFC de 1 kW _e desenvolvido no IPEN	39
4.2 Desenvolvimento de um modelo matemático para um sistema conversor de corrente contínua (sistema conversor cc-cc), incluindo um módulo de célula a combustível PEMFC	43
4.3 Simulação da capacidade do sistema conversor cc-cc em elevar o potencial para 14,4 V e mantê-lo constante	46
4.4 Acumulador de energia chumbo ácido	48
4.5 Montagem e teste do protótipo	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 O Modelo matemático do sistema conversor de corrente contínua	57
5.2 Simulação da capacidade do sistema conversor cc-cc em elevar o potencial do barramento em 14,4 V, e mantê-lo constante	64
5.3 Projeto e montagem do sistema HYBRIDGEN com tecnologia	

nacional.....	70
5.4 Teste do HYBRIDGEN, a carga do acumulador e sua capacidade para atender à demanda de energia.....	74
5.5 Análise de Estabilidade.....	78
6 CONCLUSÕES	85
APÊNDICE A – Rotinas de Programação para a simulação da estabilização do potencial de barramento no modelo do sistema conversor cc-cc.....	88
APÊNDICE B – Ensaio no MCC1 e MCC500.....	89
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, bem como as demais formas de energia, têm desempenhado um papel estratégico nos indicadores de qualidade de vida da população, assumindo, a cada dia, um maior grau de importância (LAGO, 2006).

Na figura 1 foi mostrado que a fonte primária de grande parte da energia produzida no mundo é obtida através de combustíveis fósseis, com predominância de três combustíveis, respectivamente, petróleo, carvão mineral e gás natural, num montante de 81,3 %, enquanto que a energia ofertada, oriunda de fontes renováveis, apresenta apenas 12,2 % do total. Vive-se também um crescente uso, mas de modo lento, da energia nuclear, que devido a fatores de aceitação pública, e a questões de não proliferação, apresenta um futuro incerto (BUNN, M., *et al.* 2010), (ABRECHT, *et al.* 1977) e (LINARDI, 2010).

Figura 1 – Oferta de Energia por Fonte, Mundial, (2008).
Fonte: Adaptado de: BEN, Anexo III, (2011); WEO - IEA, (2010).

Na figura 2 é mostrada a oferta de energia elétrica para o Brasil, onde a fonte primária, oriunda dos combustíveis fósseis, petróleo, carvão mineral e gás

natural, se encontram num patamar de 11,7 %, dos 509,2 TWh produzidos em 2010, onde 74,0% da produção é proveniente da energia potencial da água. Ao consolidar todas as fontes renováveis, inclusive importações, para a oferta de energia elétrica no Brasil, é apresentado um percentual bastante elevado, de 85,6% em relação ao total consumido, e demonstra o excelente perfil renovável dessa matriz energética (BEN, 2011).

As necessidades energéticas primárias no Brasil, apesar do excelente perfil existente no setor de energia elétrica, ainda totalizam 52,5 % em combustíveis fósseis quando considerados outros usos, e por esse motivo, ainda é enorme potencial de crescimento da produção advindos de outras fontes renováveis, uma vez que a exploração dos potenciais hidráulicos existentes hoje se encontram na faixa de 35%, com dificuldades de implantação cada vez maiores, problemas crescentes de licenciamento ambiental, e já em futuro próximo tendem a se esgotarem (TUCCI *et al.*, 2001; BEN, 2011).

Figura 2 – Oferta de Energia Elétrica por Fonte, no Brasil, (2010).
Fonte: Adaptado de: BEN, Capítulo 1, (2011).

As várias etapas dos sistemas energéticos, tais como as atividades extrativistas, sua conversão, distribuição e uso estão intimamente relacionados entre si e com o desenvolvimento de toda a humanidade (LINARDI, 2010).

Apesar de enorme relevância social e econômica, todas as atividades

relacionadas com a obtenção, distribuição e uso da energia provocam impactos no meio ambiente, uma vez que podem lançar substâncias nocivas na atmosfera, nas fontes de água e no solo, comprometendo a saúde e a sobrevivência de todo o ecossistema terrestre. Os meios de transportes, por exemplo, possuem elevado consumo energético e provocam enormes problemas devido à poluição ambiental, (CETESB, 2011).

Há uma crescente necessidade de encontrar soluções para os efeitos negativos da cadeia dos processos de produção, distribuição e uso de energia, a fim de minimizar os prejuízos sociais, ambientais e econômicos, nesse sentido, novas fontes geradoras são procuradas (SZWARC, 2007).

As características desejáveis para fontes geradoras de energia elétrica são: de perfil limpo, renovável, baixa emissão de ruídos, baixo custo de operação, alta confiabilidade, entre outras. Como uma das opções para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e ambientalmente sustentáveis está o gás hidrogênio, que vem sendo utilizado como vetor energético, ou seja, um armazenador de energia, para muitos tipos de fontes de energia, pois pode ser obtido a partir de diversos processos energéticos; dos quais podem-se citar três. O primeiro é a produção do hidrogênio pela eletrólise da água a partir da utilização do excedente de produção energia elétrica de painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, hidrelétricas, energia geotérmica e usinas nucleares. O segundo através do uso da energia de biomassa com posterior gaseificação e purificação, como lixo, esgoto, bem como as sobras da produção florestal, agroindustrial e agrícola. O terceiro processo energético, que tem encontrado maior viabilidade econômica nos dias atuais, é suportado na reforma catalítica e na gaseificação, processos que proporcionam melhor eficácia e reduzem o potencial poluidor dos combustíveis já em uso, como etanol, biodiesel, carvão, petróleo e gás natural. A produção de hidrogênio no Brasil tende a crescer tomando por base o bioetanol (BROWN, 2001), (LIGURAS *et al.*, 2004; VAIDYA e RODRIGUES, 2006 e LINARDI, 2010).

Dentre as opções de geração de energia elétrica suportadas no gás hidrogênio está o módulo de energia baseado na tecnologia de Células a Combustível que é disponível em vários tipos. Dentre elas as *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) são compactas, leves e fornecem elevada densidade de potência, além de facilidade ao partir, operar e desligar o sistema. Trata-se de

uma solução que possibilita gerar energia elétrica com elevada eficácia, livre de ruídos e emissões prejudiciais, bem como pequena geração de resíduos poluentes nas etapas de fabricação, operação e descarte (LINARDI, 2010). A essa configuração de geração de energia elétrica, suportada na tecnologia PEMFC, denominou-se de sistema convencional. Nesse sistema, não é possível correções de variação de potencial elétrico ao se gerar a energia elétrica, nem correções de variações repentinas de demanda, da carga.

Em um sistema gerador de energia elétrica híbrido, composto por um módulo PEMFC, associado a um acumulador tipo chumbo-ácido, que se denominou de sistema híbrido de segunda geração, além das qualidades já citadas, aplicáveis aos sistemas convencionais, também é capaz de fornecer energia elétrica imediatamente para a carga, em situações adversas, como incapacidade total ou parcial da fonte principal, oscilações de potencial, e é capaz de fazer a correção da variação fortuita do potencial elétrico na geração de energia elétrica, entretanto a sua capacidade para suprir a falta de geração de energia elétrica é pequena, e da ordem de minutos.

Já o sistema híbrido, composto por um módulo PEMFC associado a um acumulador tipo chumbo-ácido, adequadamente dimensionado, que se denominou de terceira geração é bem mais flexível, e permite oscilações na carga, correções na geração, mantendo a estabilidade e o funcionamento ininterrupto do sistema gerador, por tempo indeterminado. Entre outras vantagens dispensa o uso de componentes de custo extremamente elevado a exemplo de ultracapacitores, bem como permite a otimização ao evitar a instalação de unidades geradoras adicionais, necessárias em modelos de gerações anteriores.

Os sistemas geradores de energia elétrica híbridos, de terceira geração, equipados com acumuladores bem dimensionados, por disporem de capacidade para suprir o excesso de demanda de energia à carga, atender às situações adversas, e evitar o superdimensionamento da unidade principal, podem ser uma possível solução para redução de custos e melhoria da eficácia das instalações. Entretanto, esta tecnologia ainda não está disponível no país, (ROCCO, A. M, 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Contribuir no desenvolvimento de um protótipo com tecnologia nacional, focado nos sistemas de terceira geração de energia elétrica híbrido, composto por um módulo de células a combustível tipo PEMFC associado a um Acumulador Chumbo Ácido.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

1. Desenvolver um modelo matemático para um sistema, incluindo um módulo de célula a combustível, combinado a um conversor elevador de corrente contínua (conversor cc-cc);
2. Simular a capacidade do sistema em elevar o potencial do barramento para 14,4 V, e mantê-lo constante, por intermédio de simulação computacional no programa Matlab7® Mathworks, (2007);
3. Desenvolver estudos de estabilidade no modelo matemático do sistema conversor cc-cc;
4. Projetar e montar o HYBRIDGEN com tecnologia 100% nacional;
5. Realizar testes operacionais para demonstração de sua viabilidade técnica, e mostrar sua capacidade de operar em modo contínuo, carga com demanda variável e fator de carga inferior a 50%.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Células a Combustível Tipo PEMFC

A célula a combustível é, em síntese, um transformador direto e contínuo de energia eletroquímica em energia elétrica e calor, cujos reagentes gás hidrogênio, no ânodo e gás oxigênio, no cátodo e são supridos externamente (WENDT *et al*, 2002).

Na tabela (1) são apresentados os principais tipos e as características importantes das diversas tecnologias aplicadas nos geradores eletroquímicos, tipo células a combustível, classificadas de acordo com as características dos seus eletrólitos. Entre os principais tipos destacamos: células a combustível alcalina (AFC), células a combustível de ácido fosfórico (PAFC), células a combustível de membrana polimérica trocadora de prótons (PEMFC), células a combustível a carbonato fundido (MCFC) e célula a combustível a óxidos sólidos (SOFC).

Tabela 1 – Cinco Tipos Principais de Células a Combustível

Tipo	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
Eletrólito	Líquido KOH	Líquido H ₃ PO ₄	Polímero Náfon	Carbonatos Fundidos	Cerâmico
Espécie transportadora da carga	OH ⁻	H ₃ O ⁺	H ₃ O ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Temperatura de operação: °C	60 - 90	160-200	80 - 90	650 - 700	800 - 1000
Catalisador	Platina	Platina	Platina	Níquel	Perovskitas
Combustível	H ₂	H ₂	H ₂ Metanol	H ₂ CH ₄	H ₂ CH ₄ ; CO

Fonte: Adaptado de: Linardi, (2010), Capítulo 4, Sheng, (2010), Capítulo 1.

Na tabela 2 foram mostrados as principais vantagens, desvantagens e aplicações para diversos tipos de células a combustível.

Tabela 2 – Principais Vantagens, Desvantagens e Aplicações para as Células a Combustível

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
AFC	Tecnologia de elevada eficiência, ambientalmente de conversão amigável.	Alto custo, curta vida útil, sensível ao CO ₂ , necessita de gases ultra-puros.	Espaciais, militares e aplicações especiais
PAFC	Tecnologia de geração de energia elétrica relativamente consolidada. Podem ser abastecidas com combustíveis relativamente limpos, derivados do processo de reforma de combustíveis fósseis como o Gás Natural e o GLP.	Eficiência limitada pela corrosão, sensível ao CO ₂ , requer o emprego de catalisadores à base de metais nobres como a platina, alto custo.	Centrais de cogeração com potência de 50 a 1.000kW, destinadas a suprimento de eletricidade e de calor
PEMFC	Estrutura compacta, a facilidade de fabricação, pequeno peso, longa vida, robustas, operação flexível, elevada eficiência e densidades de correntes, permite aplicações que requerem partidas rápidas.	Elevado custo da membrana polimérica e do catalisador de platina, sensibilidade a contaminação da platina pelo CO.	Indústria automotiva, espaçonaves, aplicações estacionárias, centrais de cogeração
MCFC	Tolerância ao CO e ao CO ₂ , eletrodos a base de níquel (não exige metais nobres), a reforma do combustível pode ser no ânodo, elevada eficiência.	Problemas com materiais devido a elevada temperatura de operação, difícil controle da corrosão no cátodo, necessidade de reciclagem do CO ₂	Unidades estacionárias de cogeração, suprimento de eletricidade e de calor.
SOFC	Alta eficiência, cinética favorável, reforma no ânodo	Problemas com materiais devido a elevada temperatura de operação, problemas de expansão térmica, necessidade de pré-reforma.	Unidades estacionárias de cogeração, suprimento de eletricidade e de calor.

Fonte: Adaptado de: Linardi, (2010), Capítulo 4, Sheng, (2010), Capítulo 1.

A célula PEMFC, como mostrado na tabela 2, possui excelentes propriedades para usos em sistemas híbridos, pois esses sistemas exigem estrutura compacta, pequeno peso com ciclo de vida elevado, robustez e operação flexível, e por isso perfeitamente adaptável às soluções embarcadas. Adicionalmente, permite aplicações que requerem propriedades especiais diversas mas, principalmente, partidas rápidas com elevada densidade de corrente (LINARDI, 2010), (SHENG, 2010).

As equações 1, 2 e 3 mostraram que em uma célula a combustível tipo PEMFC duas reações de meia célula ocorrem, simultaneamente, sendo uma reação de oxidação (perda de elétrons) no ânodo, reação 1, ao potencial de equilíbrio de 0,0 V em relação ao potencial normal de eletrodo de hidrogênio (NHE), e a outra reação de redução (ganho de elétrons) no cátodo, reação 2, ao potencial 1,229 V NHE. Essas duas reações perfazem as reações de oxidação e redução na célula a combustível, responsáveis pela formação da água a partir dos elementos hidrogênio e oxigênio, alimentados na forma de fluxos de gases contínuo. Estas reações também fornecem calor e dois mols de elétrons por mol de água formada, obtidos no ânodo, enviados ao cátodo pelo circuito elétrico externo de interligação às duas reações eletroquímicas (LINARDI, 2010):

Na figura 3 foi mostrado o esquema básico de funcionamento de uma célula a combustível unitária, tipo PEMFC.

Figura 3 – Esquema de funcionamento de uma Célula a Combustível unitária, tipo PEMFC.
Fonte: Adaptado de: Linardi, (2010), Capítulo 4.

A energia produzida pela célula a combustível está ligada ao conceito de calor de formação, que pode ser entendido como a quantidade de calor libertada ou absorvida na síntese de um mol de determinada substância na temperatura de 25°C, e pressão de uma atmosfera, partindo-se de substâncias no estado e forma alotrópicos mais comuns. Esta energia total ou calor de reação é denominada de entalpia, e se subdivide em energia liberada na forma de calor irreversível, associada à energia que pode ser aproveitada na forma de trabalho elétrico, denominada de energia livre de Gibbs, de forma reversível (FELTRE, 2004).

O rendimento global de uma célula a combustível depende do aproveitamento ou não da energia apresentada na forma de calor. Nos casos em que exista disponível um processo de recuperação de calor, como pela utilização de turbo geradores elétricos, é possível a elevação da eficácia ao se utilizar, parcialmente, o calor produzido (LARMINIE e DICKS, 2003).

A eficiência teórica máxima, a variação da entalpia da reação e o calor oriundo de uma célula a combustível podem ser obtidos pelo uso das equações 4, 5 e 6 (COOK, 2002).

$$\eta_p (\%) = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\Delta H \text{ (kJ/mol)} = \Delta G + T \Delta S \quad (5)$$

$$Q (\%) = \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} \cdot 100 \quad (6)$$

Sendo, (dados para as condições normais):

$\eta_p (\%) =$ 83% do rendimento teórico máximo para uma célula a combustível tipo PEMFC, sem o aproveitamento do calor, equação 4;

$\Delta H =$ -285,8 kJ/mol de água formada, que é a variação da entalpia da reação, equação 5;

$Q(\%) =$ 17 % da entalpia que é a fração da energia produzida pela célula a combustível, liberada sob a forma de calor, equação 6;

$\Delta G =$ -237,1 kJ/mol de água formada, variação da energia livre de Gibbs, que é o trabalho elétrico máximo disponibilizado na reação;

$T \Delta S =$ 48,7kJ/mol, calor restante da reação ocorrida que não se transformou em trabalho elétrico, equivalente à temperatura (em graus Kelvin) vezes a variação da entropia.

Tem-se que o potencial elétrico obtido devido à energia livre de Gibbs pode ser representado como em 7 (CUNHA, 2009);

$$E_g (V) = \frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (7)$$

Sendo:

$n =$ 2, número de moles de elétrons por mol de água formada;

$F =$ Constante de Faraday, que representa a carga elétrica de 96.485, por mol de elétrons, em Coulomb;

$E_g = 1,229V$, potencial elétrico, em Volt.

O potencial elétrico teórico devido à energia total de reação (entalpia), sem perdas devido ao calor, pode ser representado como na equação (LINARDI, 2010);

$$E_r (V) = \frac{\Delta H}{n.F} \quad (8)$$

Sendo:

$E_r = 1,481V$, potencial elétrico, em Volt.

$$\eta_p (\%) = \frac{E_g}{E_r} . 100 \quad (9)$$

$$\eta_{op} (\%) = \frac{E_{op}}{E_r} . 100 \quad (10)$$

Então: $\eta_p (\%) = 83\%$; representa o rendimento teórico máximo nas condições normais (25°C, 1 atmosfera), para uma célula a combustível tipo PEMFC, sem o aproveitamento do calor, obtido por intermédio da relação entre os potenciais, como mostrado na equação 9;

Para se calcular a eficiência global de uma célula a combustível, em determinado ponto de operação, por generalização, pode-se utilizar a equação 10, que relaciona o potencial elétrico entregue pela célula a combustível em operação (E_{op}) ao potencial elétrico teórico devido à energia total de reação (HOOGERS, 2003).

Tal procedimento se explica, pois o potencial entregue à carga está associado à capacidade do gerador eletroquímico em realizar trabalho elétrico, e uma célula a combustível com comportamento ideal deveria entregar 1,229 V, que é o potencial elétrico obtido devido à energia livre de Gibbs (CUNHA, 2009).

De fato, a célula a combustível entrega, ao iniciar o seu funcionamento, com circuito aberto, um potencial de aproximadamente 1,0V, sob pressão de uma atmosfera e temperatura de 25°C. O potencial de 1,229 V não é atingido devido à diversas perdas ocorridas, mas principalmente, devido ao carregamento da dupla camada elétrica e processos eletroquímicos parasitas que aparecem nas reações de oxidação de hidrogênio no ânodo e redução de oxigênio no cátodo (COOK, 2002), (HOOGERS, 2003).

Também a perda de potencial em circuito aberto é devido à passagem de hidrogênio através do eletrólito para o cátodo, onde causa um potencial misto, advindo da oxidação eletroquímica do hidrogênio no cátodo, que compete com redução do oxigênio. Além disso, contribuem nessa perda de potencial os processos de corrosão do suporte de carbono do eletrocatalisador e a transformação de parte da energia gerada, no decorrer do ciclo de operação, por volta dos 80 °C, em calor (HOOGERS, 2003), (LINARDI, 2010).

Ao iniciar a operação o desempenho de uma célula a combustível é afetado pelos processos eletroquímicos, resistência à transferência de massa, resistência ôhmica dos componentes e condições operacionais. Essas perdas são denominadas de polarizações (HOOGERS, 2003), (CUNHA, 2009).

Na figura 4 foi mostrado como um dado importante para o entendimento do funcionamento da célula a combustível e sua interpretação, o resultado do ensaio de polarização característico, realizado no IPEN, em uma unidade geradora de eletricidade e calor, tipo célula a combustível PEMFC.

O trecho (1), denominado de região de polarização por ativação, dispõe de perdas de potencial, onde predominam processos de transferência de carga na superfície eletrodo/eletrólito, tem pequena capacidade de geração de energia elétrica e não é região de interesse para a operação, numa aplicação prática;

O trecho (2), denominado de região de polarização por queda ôhmica é o de interesse para a operação. Nele predominam as perdas devido à queda de potencial por efeito ôhmico dos componentes e possui comportamento quase linear. Tem o ponto ótimo de operação situado ao redor da densidade de corrente próximo de 0,6V@0,68A.cm⁻²;

O trecho (3), denominado de polarização por transferência de massa, por sua reduzida capacidade de produção de energia, não é de interesse para a operação, e está associado a perdas por resistências e transferência de massa em

altas densidades de corrente.

Figura 4 – Curva de Polarização característica de uma Célula a Combustível Unitária tipo PEMFC, 25 cm^2 – IPEN

Todas as fontes de potência eletroquímica perdem potencial com a elevação da demanda, e este é um fator determinante no rendimento do gerador eletroquímico PEMFC. Considera-se como boa prática utilizar-se de potenciais ao redor de 0,6 a 0,7V por célula, com o intuito de conciliar um rendimento otimizado ao investimento em potência elétrica instalada (LINARDI, 2010). Esse potencial útil disponibilizado nos terminais de cada célula PEMFC é insuficiente para muitas aplicações práticas, e por esse motivo as células a combustível devem ser associadas, com a formação de grupos em série, para elevar o nível de potencial elétrico gerado. Para tais associações dá-se o nome de módulo. Esse módulo é muitas vezes associado a outros, em paralelo, para se adequarem ao nível de demanda de energia, necessária ao sistema a ser suprido, como mostrado na figura 5 (COOK, 2002; LINARDI, 2010).

Figura 5 – Esquema de um Módulo de Células a Combustível PEMFC
 Fonte: Adaptado de: *Kinoshita*, (2001).

O IPEN trabalha desde o ano 2000 no desenvolvimento de diversas atividades voltadas à geração de energia elétrica, entre elas o desenvolvimento de tecnologias voltadas a células a combustível tipo PEMFC, tais como: eletrocatalisadores, conjuntos eletrodo/membrana/eletrodo, células a combustível unitária, módulos de 500 W_e, e 1 kW_e, bem como módulos de potências maiores. Esse desenvolvimento vem sendo aplicado com sucesso e tem gerado muito conhecimento e inovação, no Brasil.

Na tabela 3 são apresentados, para fins de ilustração, os custos médios, para nosso mercado, atualizados, para aquisição dos materiais empregados nos módulos de 10 e 20 células com área útil de 144 cm², respectivamente, de 500 W_e, e 1 kW_e, carga de platina de 0,4 a 0,6 mg cm⁻², respectivamente no ânodo e no cátodo. O Método de Impressão a Tela foi o escolhido para a confecção dos eletrodos de cada uma dessas unidades (BONIFÁCIO, 2011; CUNHA, 2009).

O caminho seguido pelo IPEN, diante desses resultados, foi a aplicação desta tecnologia nacional, desenvolvida em módulos de potência, em sistemas de geração de energia elétrica para atender a protótipos no estágio pré-comercial em módulos de 1 e 5 kW de potência elétrica.

Tabela 3 – Custo de componentes para composição de Módulos de Energia para Células a Combustível, tipo PEMFC, desenvolvidas no IPEN

Componente	Unidade	Quantidade PEMFC 10 Células	Quantidade PEMFC 20 Células	Custo unitário (R\$)	Custo 10 Células (R\$)	Custo 20 Células (R\$)
Eletrocatalisador ETEK 20% Pt/C	g	11	22	38,22	420,37	840,75
GDL - Papel Toray	pc	20	40	56,23	1.124,55	2.249,10
Membrana de Náfion 115	m ²	0,25	0,5	2.741,07	685,27	1.370,53
Solução de Náfion 5% em álcool	frasco 125ml	1	2	319,41	319,41	638,82
Placa bipolar	pc	9	19	47,16	424,40	895,95
Placa unipolar	pc	2	2	47,16	94,31	94,31
Placa de fechamento em alumínio	pc	2	2	435,46	870,91	870,91
Placa condutora corrente Cu/Al	pc	2	2	435,46	870,91	870,91
Total (materiais)					4.810,14	7.831,29

Fonte: Adaptado de: Cunha, (2009), capítulo (5); *Ion Power Ins*, com atualização.

Na figura 6 foi mostrado uma fotografia do gerador de eletricidade em corrente contínua, MCC1, desenvolvido no IPEN em parceria com a ELECTROCELL, a partir do módulo de células a combustível de 1 kW_e, equipado com unidades auxiliares, onde acima e à esquerda encontra-se a unidade de gerência de potencial e refrigeração (UGPR). Acima e à direita vê-se a unidade de controle de ventilação (UCV), logo abaixo a unidade de controle de gases (UCG), ao centro, pelo lado esquerdo o ventilador (VEN). Pelo lado direito o módulo de energia (PEMFC) é composto por 20 células a combustível e na parte de baixo da esquerda para a direita respectivamente vê-se o reservatório de água (H₂), umidificador (U-H₂) do circuito de gás hidrogênio, umidificador (U-O₂) e o reservatório de água do circuito do gás oxigênio.

Figura 6 – Fotografia do Gerador de Eletricidade em Corrente Contínua, MCC1, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®

No entanto, a plena comercialização de sistemas geradores suportados na tecnologia de células a combustível PEMFC é limitada por algumas barreiras tecnológicas, entre elas: a queda de até 51% no potencial elétrico fornecido em seu ponto ótimo de operação, onde tais perdas são provenientes, principalmente, da difícil reação de redução do gás oxigênio, no cátodo, mesmo com o auxílio de nanopartículas de catalisador de platina, suportada em carbono de alta área superficial; a perda de desempenho durante a operação da célula a combustível,

devido a corrosão na superfície de carbono usada para suportar eletrocatalisadores, na forma de nanopartículas, entre outras causas. Para a solução destes desafios científicos e tecnológicos e oferecer uma diretriz para desenvolver possíveis soluções é necessário explorar e desenvolver os entendimentos fundamentais das reações de cátodo, a cinética da reação das células a combustível e desenvolver um novo tipo de suporte de catalisador resistente à corrosão (SHENG, 2010), (HOOGERS, 2003).

Também igualmente interessante seria elevar a temperatura de operação das células, sem elevar os atuais custos de produção, substituindo a composição da célula a combustível, como materiais nobres empregados e a membrana polimérica, ativando as reações termicamente, e conseqüentemente, aumentando o seu desempenho (LINARDI, 2010).

3.2 Acumulador de Energia Chumbo Ácido

Inventado pelo francês *Gaston Planté* (1834-1889) em 1859, o acumulador denominado chumbo ácido, é de uma tecnologia bem conhecida. Logo após, o desenvolvimento do seu primeiro protótipo, em março de 1860, foi apresentado para a Academia de Ciências da França, como a primeira versão prática de um acumulador recarregável, baseado na eletroquímica de chumbo-ácido. Entretanto, como ainda não existia disponível no mercado, à época da invenção, um aparelho que pudesse fazer a carga do acumulador, de modo adequado, o sucesso industrial só ocorreu alguns anos depois, após o desenvolvimento de um gerador de corrente contínua, denominado máquina Gramme (KURZWEIL, 2010).

O acumulador chumbo-ácido converte energia química em energia elétrica, bem como o seu reverso, e é uma modalidade de transformação energética de grande utilização em diversas fontes de energia. No acumulador, produz-se a corrente elétrica, com as reações de oxidação no ânodo e de redução no cátodo (FELTRE, 2004).

Na figura 7 foi mostrado um esquema de um acumulador chumbo ácido com os seus principais elementos constituintes e que são: dois conjuntos de eletrodos, um de chumbo, placa negativa, no ânodo e o outro de dióxido de chumbo, placa positiva, no cátodo, intercalados por separadores de material isolante microporoso,

permeável, que assegura, também, o espaçamento entre eles; ambos mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico, com densidade aproximada de 1.280 g L^{-1} .

A grade é uma estrutura metálica constituída de liga chumbo puro, podendo ter em sua composição, para melhoria de desempenho, antimônio, cálcio e ou prata, bem como outros materiais, de acordo com cada modelo. A grade destina-se a conduzir a corrente elétrica e suportar mecanicamente os materiais ativos das placas positiva e negativa. O chumbo na forma de liga possui características especiais como: aumento na resistência mecânica, melhoria de desempenho à corrosão e maior tempo de retenção de carga (LINDEN e REDDY, 2002; PAVLOV, 2011).

Quando um circuito externo é conectado eletricamente aos terminais do acumulador, ligado, este entra em funcionamento e começa o processo de descarga, em direção ao equilíbrio químico, onde ocorre a semi reação de oxidação no chumbo e a semi reação de redução no dióxido de chumbo (FELTRE, 2004).

Figura 7 – Esquema de um Acumulador Chumbo Ácido
Fonte: Adaptado de: Pavlov, (2011), capítulo (2).

Nestes últimos anos, o mercado para a indústria de acumulador chumbo ácido tem crescido constantemente devido a interesses diversos, como os veículos

com pouca ou nenhuma emissão de poluentes, os tradicionais usos veiculares, como dar a partida, iluminar e fazer a ignição (SLI). Também como fonte de energia para empilhadeiras, carrinhos de golfe, e diversos tipos similares de crescente interesse para a aplicação do acumulador chumbo ácido como substituto do motor de combustão interna. Como trata-se de uma fonte de energia ambientalmente sustentável, pode compor sistemas híbridos, e contribuir na melhoria de eficácia dos sistemas equipados com motores de combustíveis fósseis, e reduzir a quantidade de efluentes desagradáveis e perigosos (LINDEN e REDDY, 2002),.

Este crescimento de demanda por acumuladores necessita cumprir os requisitos de desempenho a cada dia mais rigorosos que têm sido um desafio para a indústria de acumuladores. Os limites teóricos e práticos da tecnologia do acumulador ainda têm sido uma barreira para atender alguns requisitos de desempenho demandados (SCHAECK *et al.*, 2009).

No entanto, avanços significativos têm sido feitos tanto com a melhoria do desempenho dos sistemas de acumuladores chumbo ácidos convencionais como nos desenvolvimento de novos projetos (SCHAECK *et al.*, 2009).

O interesse reavivado em veículos elétricos, veículos híbridos elétricos e sistemas de armazenamento de energia para utilitários acelerou o desenvolvimento de todos os modelos de acumuladores recarregáveis. Um fator limitante para o uso do acumulador chumbo ácido nesse tipo de aplicação tem sido a sua relativamente baixa densidade de energia específica e, por esse motivo os acumuladores baseados em níquel hidreto metálico tem sido, nos últimos tempos, o sistema de acumulador de vários modelos de veículos híbridos e elétricos. Entretanto, o custo desse tipo de acumulador, em oposição ao de chumbo ácido, é ainda um fator limitante para a sua de penetração no mercado (LINDEN e REDDY, 2002).

O acumulador de chumbo-ácido possui boas características, como: baixo custo, bom desempenho, processo de carga-descarga reversível, não sofre ação química de degradação, possui elevada confiabilidade e é capaz de atuar numa ampla faixa de temperaturas. Avalia-se que ciclo de vida e a sua limitada densidade de energia por peso, embora relativamente baixos, são suficientes para um grande número de aplicações. Esse acumulador foi escolhido para compor este estudo devido às suas características vantajosas. Nas tabelas 4 e 5 foram mostradas as vantagens e desvantagens de diversas opções de acumuladores disponíveis para um sistema híbrido (LINDEN e REDDY, 2002; PAVLOV, 2011).

Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens dos Acumuladores Chumbo Ácido

Vantagens	Desvantagens
Acumulador de tecnologia , há muito tempo, conhecida, de baixo custo, capaz de ser fabricado em todo o mundo, em locais com poucos recursos tecnológicos, bem como viável em grandes e pequenas escalas de produção.	Ciclo de vida relativamente baixo.
Baixo custo de produção, em comparação com outros tipos de acumuladores, componentes facilmente recicláveis, desempenho razoável em altas e baixas temperaturas de operação.	Limitada densidade de energia, tipicamente 30 a 68 Wh / kg.
Eficiência superior a 70 % nos processos de carga e descarga, e boa retenção de carga para ciclos de trabalho intermitente.	Armazenamento de longo prazo deve ser realizado com acumulador carregado, pois descarregada é passível de danos irreversíveis aos eletrodos, por sulfatação.
Disponível na modalidade "livre de manutenção".	

Fonte: Adaptado de: Linden; Reddy, (2002), Capítulo (23).

Tabela 5 – Característica dos diversos outros tipos de Acumuladores

Tipos de acumuladores e aplicações	Vantagens	Desvantagens
Acumulador alcalino de níquel-ferro . Foi introduzido por Thomas Edison, em 1908 como uma fonte de energia para os primeiros automóveis elétricos, é aplicado em caminhões industriais, veículos de trabalho subterrâneos, vagões ferroviários e aplicações estacionárias	Excelente durabilidade	Alto custo de produção, elevado custo de manutenção, pequena densidade de energia por peso
Acumulador de níquel-cádmio (primeiro acumulador alcalino). Criado por Waldemar Jungner, cientista sueco, tem a sua primeira utilização em 1899, aplicável em telefones celulares, ferramentas, brinquedos e aplicações industriais.	São menores que os acumuladores de chumbo ácido, recarregáveis, e excelente vida útil.	Custo de produção mais elevado que o acumulador de chumbo-ácido, reduzida a capacidade de carga, efeito memória
Acumulador de íons lítio . Criado por Manley Stanley Whittingham, químico americano, com primeira utilização na década de 1970, é aplicável em dispositivos portáteis, como a maioria dos notebooks e smartphones.	Armazena o dobro de energia em comparação ao acumulador de níquel-hidreto metálico e três vezes mais que um acumulador de níquel cádmio, não possui efeito memória, mais leve.	Apresenta custo mais elevado e necessita de um circuito eletrônico incorporado para gerenciamento das suas funcionalidades de carga, descarga e aquecimento.
Acumulador de níquel-hidrogênio . Desenvolvido pela COMSAT, empresa americana de telecomunicações, com primeira utilização em 1977, é aplicado em satélites, telecópiers e sondas espaciais.	Possui longa vida útil, e é recarregável. Pode durar por 15 anos ou mais.	Gera pouca energia, com elevado custo de produção, não sendo atrativo para uso popular.
Acumulador de lítio-polímero . Desenvolvido por Michel Armand, químico francês, sua primeira utilização: 1979, utilizados em veículos elétricos	Seguro e hábil para suportar grande tempo de estocagem.	Processo de fabricação mais sofisticado exige maiores custos industriais
Acumulador de sódio-cloreto de níquel (Zebra - Zero emission batteries research activity). Criado por Dr. Johan Coetzer, África do Sul, primeira utilização em 1982, aplicado em veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia.	É seguro e relativamente barato, possui alta densidade de energia, seu material é abundante e amigável com o meio ambiente.	Para funcionar necessita de temperaturas da ordem de 250 a 300 °C, devendo ser montado em caixa com excelente isolamento térmica, e fora de operação retém carga por pouco tempo.
Acumulador níquel-hidreto metálico Desenvolvido pela Daimler AG (Alemanha), primeira utilização em 1989, é utilizado em veículos elétricos e dispositivos portáteis.	Menos suscetível ao efeito memória, recarregável, não utiliza material caro e tóxico como o cádmio, durabilidade elevada.	Auto descarga elevada, custo de produção ainda elevado, quando comparado ao acumulador chumbo ácido

Fonte: Adaptado de: *Linden; Reddy, (2002), Capítulo 23.*

As reações químicas de descarga que ocorrem em um acumulador são descritas nas equações de 11 a 13 (SILVA, 1980; FELTRE, 2004).

Reação anódica:

Reação catódica:

Reação geral:

A corrente elétrica através do circuito externo mantém o balanço entre as reações de redução e oxidação. Para se manter o balanço entre as reações eletroquímicas os elétrons entregues ao eletrodo negativo se deslocam até o eletrodo positivo onde são absorvidos durante as combinações entre os reagentes, e provocam queda de potencial. Os fenômenos responsáveis pela queda do potencial elétrico nos terminais do acumulador são também denominados de polarizações, e os seus efeitos são equivalentes a uma impedância e define a eficiência do sistema acumulador (PAVLOV, 2011; SILVA, 1980).

O fenômeno da polarização, bem como os ciclos de funcionamento, têm exigido desenvolvimento de novos materiais e métodos, tanto para redução dos seus efeitos, como para elevar a vida útil e a aplicabilidade dos acumuladores. Como exemplo podem-se citar os sistemas de acumulação veiculares híbridos que se recargam com elevado número de ciclos, em modo intermediário (sem atingir o máximo), com diversas demandas elevadas de curta duração (como nos momentos de aceleração), característica que é crítica e deve ser objeto de muito cuidado nos projetos dos sistemas de acumulação (SCHAECK *et al.*, 2009; FERNANDEZ *et al.*, 2010).

Outro fator de vital importância para a vida útil do acumulador é o controle de cargas, pois garante que a quantidade acumulada se mantenha com o potencial de até 14,4V, podendo oscilar entre níveis 14,1 V a 14,4 V, para um regime de carga ser considerada satisfatório (ABNT-NBR14200, 1998). O potencial elétrico fornecido ao inversor é de perfil mais flexível e pode situar-se até um pouco além de 14,4V. Tolerar-se, entretanto, o valor inferior, em até 10,5 V, aos 25 °C, que é o valor mínimo permitido, sem que haja sacrifício da vida útil do acumulador (SILVA, 1980).

Entretanto, novos avanços tecnológicos são necessários para a permanência do acumulador chumbo ácido no mercado, como: na elevação da sua vida útil; na fixação mais aperfeiçoada do material ativo das grades, pela substituição da composição das ligas de chumbo; na redução das perdas por deficiências na retenção da energia estocada. Para atingir este objetivo variadas técnicas podem ser aplicáveis, tais como: a redução do teor de antimônio nas placas, o acréscimo de cálcio nas ligas das grades e melhorias no projeto (CHANG *et al.*, 2009);

Também na modificação dos equipamentos de fabricação, na utilização de novos métodos de reutilização de material ativo, de produção, nas estruturas de suporte de componentes ativos, nos componentes não ativos, tais como: separadores, caixas, e selos (SILVA, 1980), (CHANG *et al.*, 2009) .

Para atender as diversas aplicações de armazenamento de energia, sistemas híbridos e de uso veicular como: serviços industriais, bicicletas elétricas, automóveis, caminhões e ônibus, o intenso trabalho de desenvolvimento, ora em andamento, deve continuar (LINDEN; REDDY, 2002; SCHAECK *et al.*, 2009 e FERNANDEZ *et al.*, 2010).

3.3 Sistemas Híbridos

Existem diversas soluções para sistemas de geração que envolvem modelo híbrido de células a combustível e acumuladores. O tipo de gerenciamento deve levar em consideração a sua finalidade específica, para orientar o tipo mais adequado a ser implantado, ou seja, depende do sistema como um todo e a sua aplicação prática.

Hajizadeh e Golkar, (2010) apresentaram um modelo de módulo de células a combustível (MCC) combinado a um modelo de sistema de armazenamento de energia (SAC), associados em concepção híbrida de geração de energia elétrica.

O modelo mostrou ser muito bom para suprir a rede elétrica interligada com energia de alta qualidade e confiabilidade oriunda do MCC/SAC.

Nesse estudo, foi apresentada uma estratégia de controle para o funcionamento do sistema híbrido proposto, considerando as perturbações no nível do potencial elétrico ocorridas na rede a ser abastecida.

Os resultados da simulação mostraram o desempenho geral do sistema no controle de potência ativa, e na correção dos distúrbios de afundamento repentinos de potencial ocorrido no sistema interligado.

Entretanto, esse estudo fez apenas a simulação, obtendo bons resultados, mas não montou um protótipo, e com isso não foi possível observar o funcionamento real e fazer avaliações adicionais.

Thounthong *et. al.*; (2009) propuseram um algoritmo de controle para o sistema gerador de energia elétrica híbrido com aplicações destinado a aplicações automotivas e para geração distribuída. Para validação do modelo, foi desenvolvido um protótipo em pequena escala composto por um módulo de células a combustível PEMFC (500W; 50 A; 100 cm²; ZSW Company, Germany) como fonte principal de potência, um banco de acumuladores de 68 Ah 24 V, um banco de ultracapacitores de 292 F (30 V; 500 A; SAFT Company, France). A dinâmica do processo ocorre com o módulo PEMFC, alimentando o banco de acumuladores e por sua vez, este alimenta o banco de ultracapacitores. Tal ordem, de acordo com os autores, deve-se à dinâmica do módulo PEMFC ser a mais lenta, seguido pelo acumulador e finalmente o ultracapacitor.

Os resultados do estudo mostraram a capacidade do algoritmo para gerenciar o intercâmbio de energia no sistema, Entretanto, esse estudo tem foco no algoritmo de controle e não aprofundou nas avaliações específicas para uso híbrido automotivo e de geração distribuída. Seria interessante apresentar o funcionamento do sistema sem o ultracapacitor em um teste, e sem o acumulador em outro, e então observar a real contribuição de cada unidade. Também seria útil avaliar o funcionamento do sistema em um tempo um pouco maior, descrever melhor o controle de temperatura e do combustível para o módulo de células a combustível.

Granovskii *et. al.*, (2006) apresentaram um estudo, utilizando-se de dados publicados a partir de várias fontes, para comparar desempenhos econômico e ambiental, entre quatro tipos de veículos: o primeiro convencional (Toyota Corola: 136 CV, gasolina), o segundo híbrido, dois motores (Toyota Prius: motor 76CV,

gasolina, e motor elétrico, 67CV, acumulador níquel hidreto metálico (NiMH), 53,3kg, 1,8 kWh), o terceiro exclusivamente elétrico (Toyota RAV4-EV: acumulador níquel hidreto metálico (NiMH), 24 12 V, 95 Ah, 27,4 kWh, 430 kg) e o quarto a hidrogênio (Honda FCX Clarity: módulo PEMFC, 78 kW, 67 kg, eficiência, 60 %; acumulador íons de lítio, 288 V; motor elétrico, 136 CV; 4.1 kg de hidrogênio).

Para fazer a comparação foram utilizados procedimentos matemáticos; normalização de indicadores econômicos (preços dos veículos e dos combustíveis durante a sua vida útil, a forma como são usados); também de indicadores ambientais (quantitativos de emissão de gás de efeito estufa, poluição atmosférica); e a relação ótima entre os tipos de veículos na frota.

De acordo com a comparação feita pelos autores os veículos elétricos e os híbridos obtiveram melhores resultados. Avaliou-se que a eficácia econômica e o impacto ambiental da utilização de carro elétrico dependem substancialmente de como a eletricidade é produzida; se origina-se de fontes de energia renovável, o veículo elétrico é o mais eficaz; se a eletricidade provém de combustíveis fósseis, o veículo híbrido torna-se o mais competitivo.

Quando o cenário envolve situações hipotéticas, o veículo elétrico poderia tornar-se competitivo nesses cenários ao adicionar-lhe um sistema de turbina a gás natural, combinado a células a combustível, e produzir eletricidade no próprio veículo.

Esse estudo finaliza com uma conclusão bem razoável, ou seja: a associação de um sistema para processar o combustível no próprio veículo. Tal sistema poderia ser também um reformador ou gaseificador adaptado para ser instalado no veículo.

Harfman-Todorovic *et. al.*, (2006) mostraram o funcionamento de um sistema de alimentação de energia elétrica para um *notebook* (SIEN), com duas opções de alimentação: a primeira pela rede comercial, utilizando-se de um conversor retificador (60 W, 19,0V); e a segunda baseado em um módulo de célula a combustível PEMFC (30 W_e; 6 V; modelo BCS 25-10 da BCS *Fuel Cells*). Os conversores de corrente contínua foram utilizados para estabilizar o nível do potencial elétrico do barramento de corrente contínua suprido pelas duas fontes, em 8, 9 ou 10 V. Durante as faltas de energia comercial, o SIEN comanda a alimentação do notebook para um conjunto de acumulador de íons de lítio (22 W_e; 14,8V), enquanto o potencial do barramento não decresce para 9V. Ao atingir 9V o sistema de controle transfere o suprimento de energia para o BCS 25-10 e ao

mesmo tempo inicia o processo de carga do acumulador de íons de lítio, por intermédio do BCS 25-10. O banco de ultracapacitores (*Maxwell Technologies*), é utilizado para compensar a dinâmica lenta do BCS 25-10, e é de pequena capacidade. Ao retornar a energia da rede o retificador eleva o potencial do barramento para 10V, e ao mesmo tempo desliga o suprimento pelo BCS 25-10, e o processo de carga do acumulador de íons de lítio passa a ser suprido pelo retificador.

O sistema proposto é instalado de modo externo ao *notebook* e apresenta-se como um novo conceito, segundo seus autores, ao utilizar um sistema híbrido de módulo PEMFC e acumulador de íons de lítio. Também insere-se nesse novo conceito o seu sistema de controle ajustado para várias entradas de suprimento, em um mesmo barramento de corrente contínua, suportadas por conversores bidirecionais, em cada derivação de fonte ou carga.

Os autores sugeriram que células a combustível são potencialmente viáveis para substituir acumuladores como fontes de energia, para a próxima geração de equipamentos portáteis, graças à sua característica de elevada densidade de energia por peso. Dois tipos de células a combustível de baixa temperatura são as mais prováveis para aplicações portáteis: módulo de célula a combustível a metanol direto (DMFC) e módulo de célula a combustível PEMFC.

Os resultados experimentais, segundo seus autores, mostraram que o sistema funciona bem em situações de perturbação no barramento de corrente contínua. Esta topologia funciona melhor que o sistema convencional de alimentação, através de conversor retificador associado ao acumulador de íons de lítio. Por conseguinte, esta proposta de híbrido pode também ser usada para a alimentação de energia para outras aplicações portáteis.

Nesse estudo obtiveram-se bons resultados de grande valor conceitual, mas ele envolveu um consumo de pequenas quantidades de energia, com a utilização de componentes facilmente disponíveis no mercado, e acredita-se não se aplicar, de forma imediata, a protótipos destinados a geração distribuída.

Choi *et. al.*, (2006), neste artigo, apresentaram um estudo composto por um projeto de sistema não convencional de emergência (UPS) com a função de alimentar cargas ininterruptas de 1 kVA. É constituído por dois módulos PEMFC (0,50kW_e, PEMFC, 25 a 39 V, *Avista Laboratories*) em que cada módulo PEMFC

emprega um conversor elevador (conversor cc-cc, 500W_e, de: 25-39 V para: 50 V); um ultracapacitor de 28,1 F (40 V, 180 A, R\$ 456,00 + frete + impostos, <http://www.maxwell.com>) e que emprega um conversor bidirecional. Adicionalmente, utiliza-se de um conversor de corrente contínua, 1 kVA, acoplado a um transformador de isolamento, próprio para alta frequência, e que supri o conversor e este disponibiliza para a carga corrente alternada de 120 V, 60 Hz.

Tradicionalmente, sistemas UPS convencionais empregam grupos motogeradores a diesel e/ou acumuladores como suas fontes de energia elétrica, e com isso garantem o funcionamento das cargas com funções críticas, bem como o suprimento da demanda quando o fornecimento regular de energia elétrica sofre interrupção.

É importante para o sistema UPS ser capaz de assumir imediatamente a plena carga uma falta ou perda de qualidade da energia, e com isso evitar transtornos de mal funcionamento, perda de dados, danificação de equipamentos, perda de produção. Algumas aplicações críticas não toleram interrupções de qualquer espécie, e por esse motivo um módulo de ultracapacitores é empregado para fornecer a energia necessária, durante a partida ou em situações instantâneas, por falta ou por deficiência do sistema supridor. Essa energia pode também ser usada para manipular as condições de sobrecarga.

Conforme afirmam os autores, o uso de célula de combustível está se difundindo rapidamente entre diversas aplicações, como: para locais remotos, alimentação ininterrupta de energia e a geração distribuída.

Nesse cenário, conforme afirma Choi *et. al.*, (2006) e também os diversos outros autores, citados em 3.3, o sistema híbrido, composto por célula a combustível e acumulador, está-se tornado uma configuração para atuar em seguimentos diversos, tais: veículos elétricos, veículos híbridos, suprimento de energia a locais remotos, alimentação ininterrupta de energia (UPS), em equipamentos portáteis, bem como em geração distribuída ao suprir a rede elétrica interligada com energia elétrica de alta qualidade e confiabilidade, oriunda de geração exclusiva ou sobras de geração própria.

A cada dia esta opção se torna mais atraente, por diversos motivos, mas, principalmente, por sua característica ambiental renovável, inerentemente limpa, eficaz e confiável. Toda essa difusão é devida, também aos preços em constante

queda que possibilitam sua penetração no mercado a cada dia mais rápido.

Entre os vários tipos de células de combustível, a do tipo PEMFC atende aos requisitos de: ser compacta, leve, com alta densidade de potência de saída, de trabalhar com temperaturas próximas à do ambiente, e de dispor de facilidade para dar partida e interromper o seu funcionamento.

Entretanto, os trabalhos de pesquisa com sistemas híbridos nacionais, ainda não são suficientemente estimulados, e por isso em volumes insignificantes. A disponibilidade de peças e de principais componentes é em sua larga maioria de fabricantes no exterior. A título de exemplo citamos: as células a combustível possuem apenas poucos fabricantes e de pequeno porte; para os ultracapacitores não existe sequer um fabricante no Brasil, e esses são também os motivos para o elevado preço de qualquer iniciativa, visando o desenvolvimento desta tecnologia, no Brasil, atualmente.

3.4 Sistemas de Controle

Sistema é uma combinação de componentes que atuam em conjunto e realizam certo objetivo. Esse conceito é ilimitado e pode ser aplicado a fenômenos abstratos, sistemas econômicos e sociais. Existe grande diversidade deles a nossa volta, e todos atuam em conjunto, causando interferências de maior ou menor vulto entre si (CHIAVENATO, 2011).

Os sistemas podem ser realimentados, onde também recebem a denominação de sistemas de controle de malha fechada, ou os não realimentados, também denominados de sistema de controle de malha aberta. Os sistemas de controle, em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no processo, são denominados de malha aberta, e não serão tratados neste trabalho (CHIAVENATO, 2011).

O sistema que estabelece uma relação de comparação entre a entrada e a saída, a entrada como referência, e a diferença como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação. Neles, o sinal de saída ou uma função do sinal de saída, realimentam o controlador, de modo a reduzir o erro e ajustar a grandeza de saída do sistema ao valor desejado (DORF E BISHOP, 2009).

A figura 8 representou um diagrama de blocos de um sistema de controle, denominado de malha fechada, em que o sinal de saída realimenta, a entrada $R(s)$ (DESOER, 2009). A equação 14 representa matematicamente o sistema de malha fechada. A equação 15 representa a equação característica da equação 14.

Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema de malha fechada
Fonte: Ogata (2011).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (14)$$

$$1 + G(s) \cdot H(s) = 0 \quad (15)$$

A característica básica da resposta transitória de um sistema de malha fechada depende essencialmente da localização dos polos de malha fechada. Se o ganho de malha do sistema for variável, então a localização dos polos de malha fechada dependerá do valor do ganho de malha escolhido. É importante, então, que se saiba como os polos de malha fechada movem no plano complexo (s), à medida que o ganho da malha varia, como mostrado na figura 9 (OGATA, 2011).

Do ponto de vista do projeto, em alguns sistemas, o simples ajuste do ganho pode mover os polos de malha fechada para a localização desejada. Então, o problema do projeto pode se reduzir à escolha de um valor de ganho apropriado (DORF E BISHOP, 2009).

Os polos de malha fechada são as raízes da equação característica. Um método para a determinação das raízes de uma equação característica se chama de método do lugar das raízes, e permite que as raízes da equação característica sejam representadas, graficamente, para todos os valores de um parâmetro do sistema, normalmente a variação do ganho entre zero e infinito (OGATA, 2011).

Figura 9 – Gráfico representativo das raízes de uma Equação Característica

Quando se faz a variação do parâmetro considerado e elabora-se o gráfico, manualmente ou via programa de computador, pode-se visualizar as diversas localizações dos polos e avaliar possíveis modificações. Ao desenvolver a análise da equação, utilizando-se o critério de Nyquist, e as raízes da sua equação característica se situarem no semiplano esquerdo do plano s (no domínio da frequência complexa), pode-se afirmar que o sistema de malha fechada é estável (DESOER, 2009; OGATA, 2011).

Também é útil estudar o sistema utilizando do Teorema do Mapeamento de *Nyquist*, onde a estabilidade do sistema de malha fechada é avaliada pelo contorno de todo o semiplano direito de (s) , no sentido horário, com a frequência (w) variando de $-\infty$ a $+\infty$, no eixo imaginário (jw) , (percurso de Nyquist), e no percurso não houver envoltimentos da origem da equação característica 14. Nessa situação não haverá polos de malha fechada e o sistema será estável, conforme mostrado na figura 10 (OGATA, 2011).

Figura 10 – Critério de Estabilidade *Nyquist*. Gráfico com base no Teorema do Mapeamento

Com frequência a característica de desempenho de um sistema de controle é especificada em termos de resposta transitória a uma entrada em degrau e/ou impulso unitário, conforme mostrado na figura 11.

Os sistemas com energia armazenada não podem responder instantaneamente e vão fornecer respostas transitórias sempre que estiverem sujeitos a sinais de entrada ou distúrbios. Ao se analisar a resposta de um sistema com energia armazenada, utilizando a função impulso e/ou degrau unitário, as condições iniciais devem ser padronizadas, geralmente com o sistema na condição de repouso. Normalmente, antes de atingir o regime permanente, a resposta transitória apresenta-se com curvas ou oscilações amortecidas, que devem ser avaliadas, de acordo com a função impulso e/ou degrau unitário utilizados, e com cada aplicação (OGATA, 2011).

Figura 11 – Grandezas avaliadas numa Resposta Transitória: Tempo de Atraso, Tempo de Estabilização, Intensidade do Sobressinal, Intensidade do Degrau Aplicado

As principais grandezas avaliadas, normalmente são: o tempo de atraso e o tempo para a estabilização, a intensidade do sobressinal, bem como a intensidade do degrau aplicado, onde os tempos de resposta devem ser compatíveis com cada aplicação e o sobressinal não deve ser proporcionalmente muito alto (DESOER, 2009; OGATA, 2011).

4 METODOLOGIA

4.1 Módulo de Célula PEMFC de 1 kW_e Desenvolvido no IPEN

Na figura 12 é mostrada uma fotografia do módulo de 1 kW_e utilizado para na montagem do MCC1, mostrado na figura 6, para a aplicação das diversas tecnologias da eletroquímica do hidrogênio, desenvolvidas no IPEN, em geração de energia elétrica, com foco em células a combustível, tipo PEMFC (BONIFÁCIO, 2011; SPINACÉ, 2003; CUNHA, 2009 e LINARDI, 2010).

Figura 12 – Fotografia do Protótipo de 1 kW_e de 20 Células Unitárias em série, com Eletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®
Fonte: Adaptado de: Cunha, (2012).

Das tecnologias desenvolvidas destaca-se o Processo de Preparação de Eletrocatalisadores para Aplicação em Células a Combustível com Membrana Trocadora de Prótons, objeto da patente INPI 0304121-2 (SPINACÉ, et. al., 2003).

Adicionalmente à tecnologia de produção de eletrocatalisadores pelo método de redução por álcool foram estudados, para a composição do módulo, o aumento de escala na produção de eletrodos de 25 cm² para 144 cm² de área geométrica de eletrodo, pelo método de impressão a tela (BONIFÁCIO, 2011 e CUNHA, 2009), estudos de escoamento e difusão de gases nos canais das placas bipolares.

Os passos iniciais para o desenvolvimento do módulo pré-comercial, de 1kW_e, com tecnologia totalmente nacional, iniciaram-se com o desenvolvimento e testes em um protótipo de 50 W_e de célula unitária, com eletrodo de 144 cm² de área geométrica de eletrodo, que funcionou perfeitamente, como mostrado na figura 13.

Montou-se a seguir outro protótipo, para compor um módulo de 500 W_e, como mostrado na figura 14, utilizando-se do mesmo eletrodo de 144 cm², melhorando o sistema de vedação. A refrigeração foi por ar externo e a entrada de gases por múltiplos canais, em uma estrutura de 10 células, associadas em série (CUNHA, 2009). Para a execução dessa etapa, que também foi bem sucedida, o IPEN contou com a parceira da empresa Electrocell®. Os custos com materiais foram mostrados na tabela 3.

Os dados técnicos do módulo de 500 W_e foram mostrados na tabela 6.

Tabela 6, Protótipo de 500 W_e de 10 Células Unitárias em série,
com Eletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®

Tecnologia	PEMFC
Número de Células (*)	10
Área Geométrica do Eletrodo (*)	144 cm ²
Potência Nominal (*)	500 W _e
Potencial Nominal (*)	6,43 V
Corrente Nominal (*)	77,7 A
Eficiência (*)	43,4%
Temperatura de Operação (*)	65 ° C
Resistência do Eletrólito R ₁ (**)	29,1 mΩ
Capacitância da Dupla Camada Elétrica C (**)	0,0367F
Resistência de Ativação R ₂ (**)	14,9 mΩ

Fonte: Autor e Cunha, (2009); (*) modelados por Cunha, (2009); (**) modelados pelo Autor.

Figura 13, Fotografia do Protótipo de 50 W_e de Célula Unitária, com Eletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®
Fonte: Adaptado de: Cunha, (2009).

Figura 14, Fotografia do Protótipo de 500 W_e de 10 Células Unitárias em série, com Eletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®

Fonte: Adaptado de: Cunha, (2009).

O sucesso obtido com o protótipo de 500 W_e mostrou a oportunidade de seguir com as pesquisas, e então, foi montado o módulo de célula PEMFC de 1 kW_e, com dados técnicos mostrados na tabela 7, e fotografia na figura 12.

Na figura 3 foram mostrados os eletrodos (MEAs) fabricados pelo método de impressão à tela, com carga de platina, respectivamente de 0,40 mg Pt/cm² (ânodo) e 0,60 mg Pt/cm² (cátodo), para compor a camada difusora utilizou-se papel de carbono com camada difusora e membrana de *Náfon* 115. A placa unitária de compósito, representada na figura 5, consiste de uma mistura de grafite/polipropileno moldada por compressão, para posterior usinagem dos canais de gases, com 3 mm de espessura. Os canais de fluxo possuem largura de 1,5 mm, profundidade de 0,5 mm e parede de 1,65 mm, a condutividade da placa de grafite/polipropileno foi de 55 S cm⁻¹. As placas de fechamento foram confeccionadas em alumínio anodizado de 10 mm de espessura. Os custos com materiais foram mostrados na tabela 3.

Tabela 7, Protótipo de 1 kW_e de 20 células, comEletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®

Tecnologia	PEMFC
Número de Células (*)	20
Área útil do Eletrodo (*)	144 cm ²
Potência Nominal (*)	1.000 W _e
Eficiência a Potência Predominante Adotada (**)	43,39%
Potência Predominante Adotada (**)	704,55 W _e
Potencial a Potência Predominante Adotada (**)	12,81V
Temperatura Nominal de Operação (*)	65°C
Combustíveis (*)	H ₂ , O ₂

Fonte: Autor e Cunha, 2012; (*) modelados por Cunha, 2009; (**) modelados pelo Autor.

4.2 Desenvolvimento de um Modelo Matemático para um Sistema Conversor de Corrente Contínua (Sistema Conversor cc-cc), incluindo um Módulo de Célula a Combustível PEMFC.

O conversor cc-cc é usado para obter elevação ou redução do potencial de corrente contínua produzido por uma fonte, de acordo com a necessidade apresentada pela carga. O modo pelo qual o potencial é variado pode ser controlado pelo tempo de abertura e de fechamento de um transistor chaveador (RASHID, 2001).

A fonte de corrente contínua que se deseja estudar é o módulo PEMFC, mostrado, fisicamente, na figura 6, com esquema elétrico ao lado esquerdo, da figura 15, onde se encontram representados: a resistência do eletrólito R_1 , a resistência de ativação R_2 , a capacitância da dupla camada elétrica C , e o potencial de circuito aberto E , (AHMED, 2000).

Figura 15 – Pré-projeto do Esquema Elétrico do Sistema Elevador de Corrente Contínua, composto por um Protótipo PEMFC de 1 kW_e, um Conversor Elevador e a Carga.

Compõem o sistema elevador de potencial o módulo PEMFC de 1kW_e, o transistor T, indutor L, o diodo D e a carga R_o. A combinação desses componentes, mostrados na figura 15, associados ao monitoramento do potencial de saída, ao controle do tempo de chaveamento do transistor, permitem obter o potencial variável desejado (AHMED, 2000).

O módulo PEMFC de 1kW_e, possui a característica de potencial de saída variável com a demanda solicitada pela carga, e o potencial se comporta de modo equivalente ao mostrado para a célula unitária da figura 4. Portanto, com a finalidade de manter o potencial de saída do conversor cc-cc estabilizado é necessário monitorar o potencial de saída, variável, fornecido pelo módulo PEMFC de 1kW_e, e alimentar o controlador com esse sinal de realimentação.

Com o objetivo de avaliar, previamente, o comportamento do sistema de controle, com as desejadas características apresentadas, elaborou-se o pré-projeto mostrado na figura 15, que exigiram etapas adicionais:

1. Medições de corrente e de potencial no módulo PEMFC de 1kW_e;
2. Elaboração da necessária curva de polarização a partir das medições de corrente e de potencial desenvolvidas;

3. Dimensionamento dos parâmetros: indutância (L), capacitância da dupla camada elétrica do módulo PEMFC de 1kW_e (C), resistência ôhmica da associação de 20 eletrodos (R_1), resistência de ativação da associação de 20 eletrodos (R_2), potencial de circuito aberto do módulo PEMFC de 1kW_e (E); todos os parâmetros foram obtidos a partir da curva de polarização e de parâmetros de outro módulo (SR-12, Avista Labs).
4. Por intermédio da obtenção desses parâmetros foi possível a definição do esquema elétrico do sistema;
5. Ao se fazer a associação do esquema elétrico do sistema a diversos cálculos matemáticos e aos parâmetros do módulo SR-12, gerou-se o esquema elétrico parametrizado;
6. O esquema elétrico parametrizado deu suporte à elaboração de um sistema de seis equações diferenciais lineares, que solucionado, permitiu dar forma ao modelo matemático do sistema.
7. O passo seguinte foi a continuidade aos procedimentos desenvolvidos, iniciados a partir do pré-projeto do sistema elétrico. O modelo matemático do sistema obtido nesta fase preliminar, ainda precisou de modificações em sua forma de apresentação para que se adequasse à forma exigida pela modelagem. Com esse intuito adequar a forma exigida pela modelagem foram desenvolvidos diversos passos de manipulações matemáticas, para enfim, apresentar o modelo matemático do sistema na forma de uma função de transferência.

Então, para simular o comportamento do sistema ao fazer o controle do seu potencial de saída (V_o) utilizou-se dessa função de transferência numa apresentação capaz de relacionar a variação na corrente de indutor (para se obter o potencial estabilizado) com a maior ou menor variação do tempo em que o transistor (T) se apresente ligado. Ao proceder dessa forma encontrou-se a equação capaz de representar o funcionamento do sistema conversor (AHMED, 2000; OGATA, 2011).

4.3 Simulação da Capacidade do Sistema Conversor cc-cc em elevar o Potencial para 14,4 V e mantê-lo Constante

O passo inicial para a análise da capacidade de controle de um sistema de energia deve ser a obtenção do seu modelo matemático de representação, que possibilita, entre outros estudos, a previsão do seu comportamento, ao aplicar sinais de entrada de teste, a exemplo da função impulso e da função degrau (DESOER, 2009).

Normalmente, não é possível saber detalhadamente como as variações de carga, os desligamentos e religamentos repentinos vão ocorrer durante a operação de um sistema de energia. Por esse motivo é necessário o uso de sinais de entrada de teste para fazer a correlação entre as características das respostas do sistema a um sinal de teste e, extrapolar o resultado, assumindo que o sistema real é capaz de se comportar de forma equivalente, como mostrado na figura 16 (DESOER, 2009).

Alguns dos sinais de entrada típicos de teste utilizados são as funções degrau, impulso, utilizadas tanto na análise experimental, como a análise matemática dos sistemas de energia e que podem ser obtidas facilmente, uma vez que esses sinais são funções de tempo muito simples (DESOER, 2009).

A seleção de quais desses sinais típicos de entrada devem ser utilizados na análise das características do sistema, dependem do comportamento que se espera ocorrer na entrada do sistema, objeto de análise e, que devem ser avaliados pela maior ou menor ocorrência, sob condições de operação (OGATA, 2011).

A resposta de um sistema de energia é constituída da resposta transitória e da resposta permanente. A resposta transitória é aquela que vai do estado inicial ao estado final num tempo determinado. Enquanto, a resposta permanente é aquela que apresentou comportamento do sinal de saída do sistema em um momento onde a sua duração mostrou-se indeterminada. Por exemplo na figura 16, a resposta permanente ocorre depois de transcorrido 20 ms (OGATA, 2011).

Figura 16 – Uso do Sinal de Entrada de Teste, tipo Função Impulso, para avaliar as características da Resposta do Sistema de Energia numa situação de Perturbação Transitória, hipotética. Grandezas avaliadas: Tempo de Estabilização, Intensidade do Sobressinal, Intensidade do Degrau de Perturbação Aplicado.

No projeto de um sistema de energia, deve ser possível prever seu comportamento dinâmico, a partir do conhecimento dos seus componentes. A característica mais importante do comportamento dinâmico do sistema de energia é a estabilidade absoluta, isto é, se o sistema é estável ou instável. Um sistema de energia está em equilíbrio se, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O sistema de energia será estável se a sua saída sempre retorna ao estado de equilíbrio, após o sistema ser submetido a uma condição inicial. Será instável quando o sinal de saída extrapolar os limites estabelecidos, considerando o estado de equilíbrio, após o sistema ser submetido a uma condição inicial, e será classificado como criticamente estável se as oscilações do sinal de saída se repetir de forma contínua (DESOER, 2009).

Como um sistema físico de energia contém energia armazenada, a saída do sistema, quando esse é submetido a um sinal de entrada, não é capaz de seguir a entrada imediatamente e, portanto, apresenta uma resposta transitória antes de assumir o regime permanente com o sinal de saída atrasado em relação ao sinal de

entrada. Esse retardo é denominado de erro estacionário, e é um indicativo da precisão do sistema (OGATA, 2011).

Então, para simular a capacidade do sistema conversor cc-cc em elevar o potencial para 14,4 V e mantê-lo constante, fez-se a definição do número de degraus e impulsos a serem aplicados e o desenvolvimento de uma rotina de programação, como mostrado no apêndice (A), onde a avaliação do comportamento do modelo foi feita pelas simulações matemáticas obtidas do modelo, elaboradas com o auxílio do programa Matlab7®.

4.4 Acumulador de Energia Chumbo Ácido

Para o dimensionamento do acumulador é necessário conhecer as características das cargas a serem atendidas. Para efeito de ilustração foram mostradas as equações para o dimensionamento 16 a 21, e apresentada uma situação hipotética, ocorrida em uma unidade de consumo. Diversas cargas devem ser atendidas pelo HYBRIDGEN, e na tabela 8 foram mostrados os significados de cada símbolo, os dados, juntamente com os resultados obtidos.

$$P_m (W) = \frac{P_1 \cdot t_1 - P_1 \cdot t_2}{60 \cdot n_m} \quad (16)$$

$$P_{carga} (W) = \frac{P_1 \cdot t_1 - P_1 \cdot t_2}{60} \quad (17)$$

$$f_c = \frac{P_{carga}}{2000} \quad (18)$$

$$f_u = \frac{P_m}{2000} \quad (19)$$

$$P_{ac} (Ah) = \frac{2000 - P_{mod}}{n_m \cdot 12 \cdot f_{ac}} \quad (20)$$

$$C_{ac} (kg) = \frac{P_{ac} \cdot 12}{d} \quad (21)$$

Tabela 8: Dimensionamento ilustrativo para o Sistema de Acumulação do HYBRIDGEN, considerando-se o tipo de Carga e rendimento do Sistema

DIMENSIONAMENTO DO ACUMULADOR PARA UNIDADE DE CONSUMO		
Carga, durante $t_1 = 10$ minutos, a cada hora	$P_1 = 2.000$ W,	110V
Carga, durante $t_2 = 50$ minutos, a cada hora	$P_2 = 500$ W,	220V
Potência predominante do módulo PEMFC,	$P_{mod} =$	704,55 W
Potência mínima do Acumulador (12V, 25 °C, 1 atm)	$P_{ac} = 173$ Ah; 2,1 kW	
Potencial nominal do acumulador, V_{ac}	$V_{ac} =$	12 V
Densidade de energia adotada	$d =$	68 Wh/kg
Peso aproximado do acumulador	$C_{ac} =$	31 kg
Rendimento médio do sistema conversor acrescido do rendimento do sistema de acumulação	$\eta_m =$	0,78
Potência média a fornecer pelo HYBRIDGEN	$P_m =$	961,54 W
Potência média demandada pela carga	$P_{carga} =$	750,00 W
Fator de utilização máximo do acumulador	$f_{ac} =$	0,80
Fator de carga	$f_c =$	0,375
Fator de utilização do HYBRIDGEN	$f_u =$	0,48

O acumulador chumbo ácido necessita para o seu funcionamento de controlador para regular a sua carga e descarga, garantindo que a carga acumulada se mantenha entre níveis adequados. O nível de carga é controlado tomando-se por base o potencial elétrico presente nos seus bornes, que é variável de acordo com cada fabricante. Entretanto, em média, para sistema de 12 V, estes valores situam-se entre 14,1 V a 14,4 V (ABNT-NBR14200, 1998), sendo que valores inferiores ou superiores devem ser evitados. O potencial elétrico do acumulador chumbo ácido, adequado ao suprimento do inversor deve situar-se nos mesmos patamares, entre 14,1 V e 14,4 V. Entretanto em casos especiais poderá chegar, no mínimo, até aos 10,5 V, aos 25 °C (SILVA, 1980 e BOSCH, 2007). Potenciais abaixo deste valor comprometem a vida útil do acumulador chumbo ácido. Nas figuras 17 e 18 foram mostrados o projeto elétrico do circuito capaz de cumprir o objetivo de controlar o potencial do sistema acumulador, bem como também, outras funcionalidades.

4.5 Montagem e Teste do Protótipo HYBRIDGEN

Iniciou-se com a elaboração de um projeto elétrico executivo completo do HYBRIDGEN, como mostrado nas figuras 17 e 18, com dados técnicos dos seus principais componentes apresentados nas tabelas 7, 9, 10, e na tabela 8 foi mostrado um exemplo de dimensionamento do sistema de acumulação.

Figura 17 – Esquema Elétrico do HYBRIDGEN, Folha 1

A concepção e posterior elaboração do projeto elétrico executivo completo, para a montagem do HYBRIDGEN, teve como principal finalidade dar sequência às diversas etapas de pesquisa e desenvolvimento, planejadas pelo IPEN, em geração de energia elétrica, com o foco em células a combustível tipo PEMFC. Como mostrado nas figuras 6, 12 a 14 alguns projetos já foram concluídos, enquanto outros ainda se encontram em curso. O módulo PEMFC de 1 kW_e, que equipa o MCC1, com tecnologia totalmente nacional, mostrado na figura 6, foi fornecido pelo IPEN e ainda se encontra em desenvolvimento. A ELECTROCELL® participou deste projeto, contribuindo, ao montar o MCC1, mostrado na figura 6, e equipando-o com unidades auxiliares de gerência de potencial elétrico e refrigeração.

O controle de potenciais é de vital importância para a vida útil do acumulador, e por consequência do HYBRIDGEN, pois garante que a quantidade de cargas acumuladas e os respectivos potenciais se mantenham entre níveis adequados (de 14,1 a 14,4 V). Em função disso a elaboração do projeto elétrico executivo completo do HYBRIDGEN necessitou do desenvolvimento de uma placa controladora para o acumulador (PCC), mostrada na figura 17.

Tabela 9: Dados Técnicos Básicos do HYBRIDGEN

DADOS BÁSICOS DO HYBRIDGEN	
Potência Nominal	2kW
Potência Nominal do Módulo de Energia tipo PEMFC	1kW
Capacidade do Acumulador de Teste	45Ah; 0,54 kWh, 12 V _{cc}
Potenciais Disponíveis	12 V _{cc} , 110 / 220 V _{ca}
Frequência em Corrente Alternada	60 Hz
Potência de Teste Máxima Alcançada	819,52 W _e
Potencial com Potência Máxima Alcançada	12,8 V
Combustíveis	O ₂ ; H ₂

Figura 18 – Esquema Elétrico do HYBRIDGEN, Folha 2

Também fizeram parte do sistema, um inversor cc-ca comercial de 2 kW_e, um autotransformador comercial de 1kVA, cujos dados técnicos foram mostrados na tabela 10 e o esquema elétrico funcional, mostrado na figura 18.

Tabela 10: Dados Técnicos Básicos do Autotransformador e do Conversor cc-ca.

DADOS BÁSICOS DO INVERSOR E AUTOTRANSFORMADOR**DADOS DO INVERSOR:**

Potência Nominal	2kW
Potência de Saída de Pico	4kW
Potencial Nominal de entrada / saída	12V _{cc} / 110V _{ca}
Potencial de Alimentação	11 a 15 V _{cc}
Forma de Onda de Saída	Senoidal Modificada
Frequência de Saída	60Hz
Temperatura de Funcionamento	-10°C a 50°C
Eficiência	90%
Peso	3,3kg
Dimensões (L x A x P):	12,4 x 15,0 x 30 cm

DADOS DO AUTOTRANSFORMADOR:

Potência Nominal	1kVA
Potencial Nominal de Entrada / Saída	110 / 220V _{ca}
Forma de Onda de Saída	Senoidal
Frequência de Saída	60Hz
Tipo	Eletromagnético
Peso	4kg
Dimensões (L x A x P):	9,5 x 11,5 x 12,5 cm

Fonte: *Maxpower*, RCG.

O acumulador chumbo ácido foi necessário para compor a configuração híbrida, e para efeito de ilustração foi mostrado, na tabela 8, um exemplo para o seu dimensionamento. Na tabela 11 foram mostrados dois tipos de acumuladores aplicáveis ao HYBRIDGEN. O primeiro, devido às suas características de moderada densidade de energia (46,5Wh/kg), foi mais adequado a aplicações em geração distribuída, enquanto o segundo tipo, devido às suas características de maior densidade de energia (85,7Wh/kg), foi mais adequado a aplicações de embarcadas.

Tabela 11: Dados Técnicos Básicos de Acumulador para uso Estacionário e Automotivo aplicáveis ao HYBRIDGEN.

DADOS BÁSICOS DE ACUMULADORES CHUMBO-ÁCIDO	
ACUMULADOR 45 Ah - ESTACIONÁRIO	
Tipo de Tecnologia (Baterias Reguladas a Válvula)	12MF45 - VRLA
Composição das Grades, Ciclável (MC)	Pb - Ca - Se
Fabricante	Moura
Potencial Nominal	12 V
Potência Nominal (descarga em 10 horas, 25 °C)	45Ah ; 0,54 kWh,
Densidade de Energia	46,5 Wh/kg
Peso	11,6 kg
Dimensões (L x A x P):	17,5 x 17,5 x 21,2 cm
Vida Útil Projetada	4 anos / 25 °C
ACUMULADOR 400 Ah - AUTOMOTIVO	
Modelo (Chumbo-Ácido):	SPL 3000 / 400
Composição das Grades, Ciclável (MC)	Pb - Ca – Se - Ag
Fabricante	Maxpower
Potencial Nominal	12 V
Potência Nominal (descarga em 10 horas, 25 °C)	400 Ah; 4,8 kWh
Densidade de Energia	85,7 Wh/kg
Peso	56 kg
Dimensões (L x A x P):	27,5 x 24,8 x 52,4 cm
Garantia	1 ano

Fonte: Maxpower: www.max-power.com ; Moura Clean: www.moura.com.br

Medições de corrente e de potencial foram necessárias para a construção das curvas de polarização, mostrada na figura 19, e para tanto foram utilizadas duas cargas dinâmicas eletrônicas de N3306A da Agilent, cujos dados técnicos foram mostrados na tabela 12. Adicionalmente, foram utilizadas uma carga resistiva de $2,36 \Omega$ (127 V / 300 W_e) e a outra de $0,45\Omega$ (220 V / 100 W_e). Também, foram empregados dois voltímetros M2042 ABB e ET4080 Minipa, um amperímetro MD6130 Icel e um termômetro digital ET2076 Minipa.

Os voltímetros e o amperímetro foram aferidos com o multímetro M2042 ABB. Os valores de potência elétrica foram obtidos por intermédio das medidas de corrente, de potencial, ao multiplicar os valores de corrente pelos valores correspondentes de potencial.

Tabela 12: Dados Técnicos Básicos da Carga Dinâmica N3306A Agilent

DADOS BÁSICOS DA CARGA DINÂMICA AGILENT N3306A

Potência Nominal	1.800 W
Potência Nominal de cada módulo	600 W
Capacidade de corrente de Teste	120 A _{cc}
Potenciais de teste	0 - 60 V _{cc} ,
Temperatura de Operação	0°C a 55°C
Potencial de alimentação	220 V _{ca}
Peso	4,6 kg
Dimensões (L x A x P):	42,6 x 17,8 x 62,5cm

Fonte: Agilent: <http://www.home.agilent.com>

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 O Modelo Matemático do Sistema Conversor cc-cc

Para o dimensionamento do modelo do conversor cc-cc foi definido que as características de operação a serem atendidas eram as condições predominantes de operação, com o foco em aplicações pré-comerciais, situadas próximas ao ponto de operação 12,81V@704,55W, como mostrado na figura 19. Ao escolher este ponto foi possível conciliar o rendimento do sistema aos investimentos em capacidade instalada do mesmo.

Figura 19 – Curva de Polarização do Módulo PEMFC de 1 kW_e, 20 Células Unitárias em série, Eletrodo de 144 cm² de Área Geométrica, desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL®

Na figura 19 foi mostrado a curva de polarização do módulo PEMFC de 1kW_e, que serviu de base para a cálculo dos parâmetros que suportaram a determinação do modelo.

O esquema elétrico do sistema conversor cc-cc parametrizado foi mostrado na figura 20. Ao lado esquerdo está o esquema elétrico módulo PEMFC de 1kW_e, ao

centro se encontra o esquema elétrico do conversor cc-cc, e à direita, a representação da carga, na forma do potencial que se deseja obter.

Figura 20 – Esquema Elétrico Parametrizado; parâmetros foram mostrados na Tabela (14).

Para efeito de ilustração foram mostradas as equações de 22 a 26 para o dimensionamento dos parâmetros do esquema elétrico, e tabelas 13, 14, onde foram mostrados os dados juntamente com os resultados obtidos.

Foi mostrado na figura 20, ao lado direito do esquema elétrico parametrizado, a representação da carga R_o . A equação 22 possibilitou o seu cálculo ao relacionar as grandezas demandadas pela carga, sendo a potência pelo quadrado da corrente elétrica (NAHVI e EDMINISTER, 2011).

$$R_o (m\Omega) = \frac{W_o}{I_o^2} \cdot 1000 \quad (22)$$

A equação 23 possibilitou o calculo da resistência interna do módulo PEMFC de $1kW_e$, R_i , ao relacionar a diferença entre o seu potencial de circuito aberto e o potencial de operação na carga, pela corrente elétrica demandada (I_o) (NAHVI e EDMINISTER, 2011).

$$R_i (m\Omega) = \frac{E - E_{op}}{I_o} \cdot 1000 \quad (23)$$

A equação 24 possibilitou o cálculo da resistência do eletrólito R_1 , com o módulo PEMFC em potência predominante, mostrado na tabela 7, ao relacionar a diferença entre o potencial de início de comportamento linear, mostrado na figura 4, e o potencial de operação pela diferença entre a corrente elétrica de carga e a corrente elétrica no início do trecho de comportamento linear (LINARDI, 2010).

$$R_1 (m\Omega) = \frac{V_i - E_{op}}{I_o - I_i} \cdot 1000 \quad (24)$$

A equação 25 possibilitou o cálculo da resistência de ativação R_2 com o módulo PEMFC em potência predominante, mostrado na tabela 7, pela diferença entre a resistência interna e a resistência do eletrólito, mostrados na figura 4 .

$$R_2 (m\Omega) = R_i - R_1 \quad (25)$$

O valor da carga elétrica contida na dupla camada elétrica do módulo SR-12 (500W_e), bem como os seus dados técnicos foram mostrados na tabela 13.

Para o dimensionamento da capacitância da dupla camada elétrica do módulo PEMFC desenvolvido no IPEN, o valor de carga elétrica do SR-12 foi considerada em dobro, no intuito de tornar-se equivalente a do módulo PEMFC de 1kW_e.

A seguir, foi aplicada a equação 26, em conjunto aos dados contidos nas tabelas 13 e 14. E, ao dividir o valor da carga elétrica acumulada na dupla camada elétrica (Q) pelo potencial de circuito aberto do módulo PEMFC de 1kW_e, (E), encontrou-se a capacitância da dupla camada elétrica (C) (NAHVI e EDMINISTER, 2011; LINARDI, 2010).

$$C (mF) = \frac{Q}{E} \cdot 1000 \quad (26)$$

Tabela 13: Dados Técnicos Básicos do Módulo PEMFC SR-12, Avista Labs.

DADOS BÁSICOS DO SR-12	
Potência Nominal	500 W _e
Tecnologia	PEMFC
Número de Células	48
Potencial de Circuito Aberto	48 V
Capacitância da Dupla Camada Elétrica	15mF
Carga Média da Dupla Camada Elétrica(*)	0,72C

Fonte: Andersen, (2006), (*) Modelado pelo Autor

Tabela 14: Dados Técnicos do Modelo Elétrico Parametrizado do Sistema Conversor cc-cc.

DADOS BÁSICOS DO SISTEMA CONVERSOR CC-CC.	
MÓDULO PEMFC - 1kW_e	
Resistência do Eletrólito Potência Predominante (R_1)	70,25 mΩ
Resistência de Ativação Potência Predominante (R_2)	48,84 mΩ
Capacitância da Dupla Camada Elétrica C	73,5 mF
Potencial do Início do Trecho Linear (V_i)	15,08V
Corrente do Início do Trecho Linear (I_i)	22,68A
Potencial Presumido da Energia Total de Reação (E_r)	29,64V
Potência Predominante de Operação (W_0)	704,55W
Corrente Predominante de Operação (I_0)	55A
Carga Média da Dupla Camada Elétrica (Q)	1,44C
Potencial Predominante de Operação (E_{op})	12,81V
Potencial de Circuito Aberto (E)	19,6V
Eficiência (n_{op})	43,4 %
Temperatura de Operação	65 °C
CONVERSOR ELEVADOR CC-CC	
Indutor (L)	256,2 μH
Frequência de chaveamento (f_{ch})	50kHz
Tempo de Chave Ligada (T_{on})	10μs
Ondulação Pico a Pico Permitida na Corrente de Indutor (I_{pp})	0,5A
Potencial de Estabilização (V_o)	14,4V
Resistência de Carga Média (R_o)	232,91 mΩ
Potência	1 kW _e

Fonte: Modelados pelo Autor

Foi mostrado na figura 20, ao centro do esquema elétrico, a representação do conversor cc-cc pelos seus elementos constituintes, o transistor, o diodo e o Indutor.

O indutor L foi calculado com base na expressão 27, descrita por Ahmed (2000), e os dados obtidos na tabela 14, onde T_{on} correspondeu à metade do período da frequência de chaveamento do transistor (f_{ch}), onde E_{op} é o valor do potencial predominante de operação, e a I_{pp} é a ondulação de corrente pico a pico permitida para o indutor.

$$L \text{ (H)} = \frac{E_{op} \cdot T_{on}}{I_{pp}} \quad (27)$$

De posse dos dados obtidos, relacionados nas tabelas 13 e 14, considerou-se que o esquema elétrico parametrizado completou-se.

Dessa forma, a obtenção do modelo matemático do sistema conversor cc-cc teve sequência com a utilização do esquema elétrico, mostrado na figura 20, associado, inicialmente a dados literais, com a finalidade de mostrar equações aplicáveis a situações diferentes das consideradas neste trabalho.

Esta etapa iniciou-se ao desenvolver, literalmente, o sistema de seis equações diferenciais lineares, no domínio do tempo (t), equações 28 a 33 culminando na equação 35, também literal, no domínio da frequência complexa (s).

Ao final do desenvolvimento das equações obtiveram os dados mostrados nas tabelas 13 e 14, que foram usados para fins de demonstração de aplicabilidade.

O desenvolvimento literal do sistema de equações diferenciais lineares foi obtido seguindo os passos mostrados a seguir:

A equação 28, $[d(t)]$ foi o resultado da adição ao ciclo de trabalho do transistor D de grau ou impulso ao controlador $[\Delta d(t)]$;

$$d(t) = D + \Delta d(t) \quad (28)$$

Na equação 29, a corrente do indutor $[i(t)]$ representou algebricamente a alteração que ocorreu pelo de grau ou impulso no controlador $[\Delta i(t)]$, na corrente (I);

$$i(t) = I + \Delta i(t) \quad (29)$$

Enquanto a equação 30 representou a soma algébrica das diferenças de potencial elétrico (DDP) ao longo da trajetória fechada incluindo R_2 ;

$$E - V_o + d(t)V_o = \frac{Ldi(t)}{dt} + R_1 i(t) + R_2 \cdot [i(t) - i_c(t)] \quad (30)$$

A equação 31 representou a soma algébrica das DDP ao longo da trajetória fechada incluindo C;

$$E - V_o + d(t)V_o = \frac{Ldi(t)}{dt} + R_1 i(t) + v_c(t) \quad (31)$$

E a corrente ocorrida na capacitância da dupla camada elétrica do módulo PEMFC como função do tempo, foi representada pela variação do potencial elétrico ocorrido em suas extremidades, como consequência do degrau ou impulso no controlador, multiplicado pela capacitância (C), em relação à variação do tempo (t), como mostrado na equação 32;

$$i_c(t) = \frac{Cdv_c(t)}{dt} \quad (32)$$

A equação 33 foi obtida pela derivação da equação 31.

$$\frac{d[d(t)] \cdot V_o}{dt} = \frac{Ld^2[i(t)]}{dt^2} + \frac{R_1 di(t)}{dt} + \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (33)$$

O sistema de seis equações diferenciais no domínio do tempo (t) de 28 a 33 foram desenvolvidas com suporte na Lei dos Potenciais de Kirchhoff (o somatório dos potenciais em torno de uma trajetória fechada é sempre igual a zero), descrita por Nahvi e Edminister (2011); sendo que a equação 33 foi obtida conforme Granville (1998).

A equação 34 foi obtida pela solução do sistema composto pelas equações 28, 29, 30, 32 e 33 e, a seguir por eliminação dos termos em corrente contínua, ainda no domínio do tempo (t).

$$V_o \Delta d(t) - \frac{Ld[\Delta i(t)]}{dt} - R_1 \Delta i(t) - R_2 \Delta i(t) + \frac{R_2 V_o C d[\Delta d(t)]}{dt} - \frac{R_2 L C d^2[\Delta i(t)]}{dt^2} - \frac{R_2 R_1 C d[\Delta i(t)]}{dt} = 0 \quad (34)$$

Na equação 34 aplicou-se a transformação de Laplace, descrita por Nahvi e Edminister (2011), modificando-a do domínio do tempo (t), para o domínio da frequência complexa (s). Agruparam-se os termos em potências complexas de (s),

e a seguir dispondo-os em função de $\frac{\Delta i(s)}{\Delta d(s)}$, encontrou-se a equação 35, que é capaz de representar a variação que ocorre na corrente de indutor, quando o controlador altera o tempo de transistor ligado (T_{on}), e devido ao seu caráter literal permite ser utilizada em situações diferentes da apresentada neste trabalho.

A equação 35 foi denominada de função de transferência.

$$G(s) = \frac{\Delta i(s)}{\Delta d(s)} = \frac{s \cdot R_2 \cdot V_o \cdot C + V_o}{s^2 \cdot R_2 \cdot L \cdot C + s \cdot (L + R_2 \cdot R_1 \cdot C) + (R_1 + R_2)} \quad (35)$$

A equação 36 foi obtida a partir da equação 35 pela substituição dos seus parâmetros, literais, com a utilização da tabela 14.

$$G(s) = \frac{\Delta i(s)}{\Delta d(s)} = \frac{s \cdot 0,0517 + 14,4}{s^2 \cdot 919,69 \cdot 10^{-6} + s \cdot 508,379 \cdot 10^{-6} + 0,1191} \quad (36)$$

A equação 36 foi utilizada para fazer os estudos de simulação de funcionamento do sistema conversor cc-cc, pois foi capaz de representar o que ocorre no sistema conversor cc-cc.

5.2 Simulação da Capacidade do Sistema Conversor cc-cc em elevar o Potencial do Barramento para 14,4 V, e mantê-lo constante.

A equação 36 permitiu a previsão do comportamento, ao aplicar sinais de entrada de teste e desenvolver estudos de outras ocorrências prováveis no sistema de energia, mesmo na ausência do sistema físico.

Devido à impossibilidade de saber detalhadamente como as variações de carga, os desligamentos e religamentos repentinos iriam ocorrer durante a operação do um sistema de energia foram usados sinais de entrada de teste no modelo, permitindo fazer uma correlação entre as características das respostas do sistema de energia a um sinal de teste. A seguir extrapolou-se o resultado, assumindo que o sistema real seria capaz de se comportar de forma equivalente.

Dessa forma iniciou-se os preparativos para a simulação da capacidade do sistema de energia em elevar, e manter constante, o potencial do barramento de corrente contínua. Como mostrado na figura 20, o barramento localiza-se entre o sistema conversor cc-cc e a carga.

O primeiro passo foi a definição das opções de números para ajustar os degraus a serem aplicados ao sistema de energia modelo, associada a uma rotina de programação desenvolvida no Matlab7[®], para a utilização do sinal de teste denominado função degrau , (DESOER, 2009), como mostrado no apêndice A.

Com a finalidade de otimizar o potencial elétrico de saída, para um ponto de operação, a cada ciclo de funcionamento do controlador, foi necessária a escolha do degrau a ser aplicado. Para tanto se fez simulações entre um, cinco e dez degraus de intensidade, que quando em um degrau o ganho foi de 0,001G(s), como mostrado no apêndice A.

Na figura 21 foi mostrado o resultado da simulação da atuação do conversor cc-cc, a uma elevação de potencial, para cada ciclo de funcionamento. No eixo horizontal tem-se o tempo decorrido em segundos; no eixo vertical o ganho de corrente em Ampere. A curva em azul representa a resposta do controlador a um degrau aplicado. As curvas em verde e vermelho, correspondem respectivamente, a cinco e dez degraus aplicados.

Figura 21 – Características das Respostas do Sistema de Energia, via modelo, a um Sinal de teste, tipo Função Degrau, para ajustar o tamanho do Degrau aplicável ao Sistema de Energia, Apêndice (A).

Na relação 37 é mostrado o tamanho dos degraus e dos impulsos aplicáveis ao controlador.

$$d(s) = [0,001 \quad 0,005 \quad 0,100] \quad (37)$$

Ao fazer a análise dos dados obtidos, mostrados na figura 21, pode-se constatar, que o tempo de elevação, em 90% do valor do acréscimo ajustado, ocorreu em 2,83 ms; o tempo para atingir o valor de pico ocorreu a 6,9 ms e o sistema estabilizou-se em 13,9 ms, todos os tempos obtidos com valor inferior ao ciclo de 60 Hz, que foram considerados muito bons. O sistema estabilizou-se, como mostrado na figura 21, nos patamares mostrados na relação 38, neste caso, pode-se concluir que todos os valores puderam atender ao sistema de controle.

$$\Delta i(A) = [0,120 \ 0,600 \ 1,210] \quad (38)$$

As respostas em potencial puderam ser obtidas a partir dos resultados mostrados na relação 38, utilizados na equação 39, que relaciona resposta em corrente com potencial apresentado na carga.

$$\Delta v(V) = 232,91 \cdot 10^{-3} \cdot i(A) \quad (39)$$

Então na relação 40 mostraram-se os resultados obtidos pela aplicação da equação 39. Dos resultados, pode-se concluir que todos os valores puderam atender ao sistema de controle, mas o tamanho de dez degraus foi considerado o mais adequado ao reduzir o número de operações.

$$\Delta v(V) = [0,0279 \ 0,1397 \ 0,2818] \quad (40)$$

Mostraram-se na relação 41 as respostas máximas em corrente, pela aplicação de 37. Novamente, pode-se concluir que todos os valores puderam atender ao sistema de controle, mas o tamanho de cinco degraus foi considerado o mais adequado.

$$\Delta i_p(A) = [0,136 \ 0,680 \ 1,360] \quad (41)$$

Então, na relação 42 mostraram-se os resultados obtidos em valores máximos de acréscimo de potencial, pela aplicação da equação 39 nos resultados mostrados na relação 41. Dos resultados pode-se concluir que todos os valores puderam atender ao sistema de controle, mas o tamanho de dez degraus foi considerado o mais adequado ao reduzir o número de operações.

$$\Delta v_p(V) = [0,0317 \ 0,1584 \ 0,3168] \quad (42)$$

Mostraram-se nas relações 43 e 44 os valores em percentuais para os valores máximos de variação de corrente e potencial mostrados na figura 21.

$$\Delta i_p = [0,2200 \ 1 \ ,0909 \ 2,2000] \quad (43)$$

$$\Delta v_p = [0,2130 \ 1,0563 \ 2,1302] \quad (44)$$

Dos resultados mostrados nas relações 38 a 44, verificou-se que todos os valores testados puderam atender ao sistema de controle.

De forma semelhante, ao que ocorreu ao fazer o teste com a função degrau, iniciaram-se os preparativos para a simulação da capacidade do sistema de energia em suportar um teste de perturbação, e manter constante o potencial do barramento de corrente contínua.

O primeiro passo foi definir as opções de números para ajustar os impulsos a serem aplicados ao modelo do sistema de energia, que associado a uma rotina de programação desenvolvida no Matlab7®, permitiu a utilização do sinal de teste, denominado função impulso, como mostrado no apêndice A, (DESOER, 2009).

Uma perturbação no potencial que possa vir a ocasionar uma instabilidade no sistema foi simulada e, o resultado da atuação do conversor cc-cc, a para cada ciclo de funcionamento, foi mostrada na figura 22. No eixo horizontal tem-se o tempo decorrido em segundos; no eixo vertical o ganho de corrente em Ampere. A curva em azul representa a resposta do controlador a um impulso aplicado. As curvas em verde e vermelho correspondem respectivamente, a cinco e dez Impulsos aplicados.

A escolha do tamanho do impulso a ser aplicado para representar uma situação real de operação, e refletir na saída do sistema de energia, foi proposta para avaliar a atuação do sistema de controle a um distúrbio de potencial elétrico.

Para tanto, fizeram-se simulações entre um, cinco e dez impulsos de intensidade, onde, para a situação de um impulso, o ganho foi de 0,001G(s), com o resultado mostrado na figura 22, por aplicação dos impulsos mostrados na relação 37. A respectiva rotina de programação foi mostrada no apêndice A.

Figura 22 – Características das Respostas do Sistema de Energia, via modelo, a um Sinal de teste, tipo Função Impulso, apêndice (A).

Foram mostradas na relação 45, para o instante zero, as respostas, em corrente, pela aplicação do teste de perturbação mostrado na relação 37, para o instante zero.

$$\Delta i_{pr}(A) = [56,2 \quad 281 \quad 562] \quad (45)$$

Com a intenção de aferir o que ocorreu como os valores do potencial correspondente à relação 45 apresentou-se a equação 46 que permitiu obter, a partir das respostas em corrente, as correspondentes respostas em potencial no barramento de corrente contínua.

$$\Delta v(V) = 232,91 \cdot 10^{-3} \cdot i(A) \quad (46)$$

Foram mostradas na relação 47 as respostas, em potencial, pela aplicação da equação 46 em 45, no instante zero.

$$\Delta v_{pr}(V) = [13,09 \ 65,45 \ 130,89] \quad (47)$$

Na relação 48 mostraram-se os sub-sinais de valor absoluto máximo, para as respostas, em corrente, quando aplicaram-se os degraus mostrados na relação 37.

$$\Delta i_{ss}(A) = [-2,36 \ -11,70 \ -23,50] \quad (48)$$

Então, na relação 49 mostraram-se os sub-sinais de valor absoluto máximo, como respostas, em potencial, pela aplicação da relação 48 na equação 46.

$$\Delta v_{ss}(V) = [-0,550 \ -2,725 \ -5,473] \quad (49)$$

Então, na relação 50 e 51 foram mostrados, respectivamente, para a condição predominante de operação, os valores percentuais em relação às correntes e aos potenciais obtidos na relação 45.

$$\Delta i_{pr} = [102,2 \ 510,9 \ 1.021,8] \quad (50)$$

$$\Delta v_{pr} = [98,94 \ 494,69 \ 989,38] \quad (51)$$

O sistema estabilizou-se, após ser submetido a impulsos de corrente de valores mostrados na relação 45, conforme a análise dos dados obtidos, mostrados na figura 22.

Ao iniciar a observação, no tempo zero, a perturbação foi máxima decrescendo rapidamente, atingindo um sub-sinal de valor absoluto máximo em 10 ms; e o sistema se estabilizou em 14,1 ms, todos os tempos com valor inferior ao ciclo de 60 Hz. Os resultados obtidos foram considerados muito bons.

5.3 Projeto e Montagem do Sistema HYBRIDGEN com Tecnologia 100% Nacional

O HYBRIDGEN foi desenvolvido com tecnologia 100% nacional, focado nos sistemas de terceira geração de energia elétrica híbrido, composto por um módulo de células a combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido, e também de outros componentes acessórios.

O projeto e a montagem do HYBRIDGEN foi feita devido à inexistência no mercado brasileiro de um equipamento com as características necessárias tanto para a pesquisa, quanto para uso comercial, dessa forma desenvolveu-se um projeto completo, incluindo uma placa controladora para o acumulador (PCC), os esquemas elétricos, os barramentos e o sistema de relés. O MCC1 foi totalmente desenvolvido pelo IPEN e ELECTROCELL® com tecnologia 100 %nacional. O HYBRIDGEN foi instalado em um sistema móvel.

Foi mostrado na figura 23, o diagrama de blocos do projeto do HYBRIDGEN, constituído nesta configuração inicial por duas fontes de energia, uma o MCC1 e a outra um acumulador de 400 Ah, além de possuir dois conjuntos de barramentos, proteção e tomadas, um inversor e um autotransformador. Na tabela 15 são mostrados os dados técnicos básicos e nas figuras 17 e 18 o circuito elétrico detalhado do sistema de controle e de força do HYBRIDGEN.

Ao lado esquerdo do diagrama de blocos do HYBRIDGEN, encontrou-se o módulo MCC1, tipo PEMFC, de capacidade nominal de 1 kW_e, mostrado na figura 6, que como fonte principal, alimenta o conversor cc-cc elevador, por intermédio do diodo. Abaixo do bloco do conversor cc-cc encontrou-se o controlador do conversor, realimentado pelo sinal de potencial do barramento.

Seguindo o diagrama de blocos encontrou-se os barramentos de controle e de força em cobre, suportados em isoladores de porcelana, inseridos em uma caixa de comandos elétricos (CCE), juntamente com a PCC, os relés, bem como o autotransformador e o inversor.

Ao lado direito e esquerdo do barramento encontraram-se dois relés RL₁ e RL₂ que atuam na proteção do sistema acumulador e são gerenciados pela placa controladora de acumulador (PCC).

Ligado ao barramento encontrou-se o acumulador, com gerenciamento

adequado para funcionar como fonte secundária, e que deu o caráter híbrido, de terceira geração, ao sistema.

Figura 23 – Diagrama de blocos do HYBRIDGEN

Na sequência encontra-se o inversor cc-ca, que permite alimentar cargas em 110 V, corrente alternada, diretamente, e/ou cargas em 220 V, por intermédio do autotransformador.

Essa unidade encontra-se em fase de pesquisa e desenvolvimento e, portanto algumas de suas características ainda não atingiram os valores nominais desejados, como a potência nominal do módulo MCC1, e a do HYBRIDGEN.

Tabela 15: Dados Técnicos Básicos do Projeto do Gerador de Energia Eletroquímica HYBRIDGEN

DADOS TÉCNICOS DE PROJETO - GERADOR ELÉTROQUÍMICO HYBRIDGEN

Tipo:	Híbrido PEMFC/Acumulador
Potência Nominal do HYBRIDGEN	2 kW _e
Potência Firme Máxima Alcançada	819,52 W _e
Potencial com Potência Máxima	12,805V
Potenciais Nominais Disponíveis	12 V _{cc} ; 127 V _{ac} ; 220 V _{ac}
Potência Nominal do Módulo PEMFC	1 kW _e
Potência do Sistema Inversor cc-ca	2 kW _e
Potência do conversor ca-ca 110-220V	1 kW _e
Potência Nominal do Acumulador	400 Ah, 12 V _{cc} , 4,8 kWh
Potência Nominal do Conversor cc-cc	1 kW _e – 12 para 14,4 V _{cc}
Barramento de Força (C, L, P)	130 x 19 x 3,18 mm
Barramento de Controle (C, L, P)	130 x 19 x 3,18 mm
Caixa para Comandos Elétricos (CCE) (C, L, P)	480 x 380 x 220 mm
Tomadas de Energia	2x12V _{cc} ; 2x127V _{ca} ; 1x220V _{ca}
Combustíveis	O ₂ ; H ₂

O *layout* da placa controladora do acumulador (PCC) foi mostrado na figura 24, onde o desenho do seu esboço foi elaborado com auxílio do *software* livre *PCB Artist Layout Software 1.3.3 (WEST_DEV® Ltd 1998-2010)*.

Ao lado superior esquerdo encontrou-se o regulador de potencial, ao centro o circuito comparador; ao lado superior direito os leds de sinalização; na extremidade direita os dois transístores Q₁ e Q₂, de saída.

A matriz desse *layout* foi impressa em folhas de papel *glossy*, adequado para impressões a laser; por um processo de transferência térmica do desenho para uma placa virgem de fenolite cobreada.

Com auxílio de uma prensa térmica foi feita a impressão do desenho das trilhas na placa de fenolite que foi exposta, por imersão, em uma solução de perclorato de ferro que possui a propriedade de corroer o cobre, nos locais em que não há camada impressa. Os componentes foram, a seguir, soldados e testados na placa de fenolite, com aplicação de verniz para proteção das trilhas e soldas.

Figura 24 – Matriz do *Layout* da Placa Controladora do Acumulador

O nível de cargas foi controlado tomando por base o potencial elétrico presente nos bornes do acumulador que alimentam o circuito comparador. O potencial elétrico de operação do circuito de controle foi mantido invariável por meio de um regulador de potencial elétrico residente, os diodos verde e vermelho sinalizaram o nível do potencial, os transistores Q_1 e Q_2 comandam os relés RL_1 RL_2 .

5.4 Teste do HYBRIDGEN, da carga do acumulador e de sua capacidade para atender à demanda de energia.

Os testes de funcionamento do Gerador de Eletricidade Híbrido (HYBRIDGEN), procuraram mostrar a sua capacidade de operar em modo contínuo, carga com demanda variável e fator de carga inferior a 50%.

Os resultados dos ensaios de capacidade no HYBRIDGEN, onde a curva em azul, representou a potência média fornecida e absorvida pelo ao acumulador em corrente contínua, no potencial do barramento, são mostradas na figura 25. A curva em preto, representou a potência entregue na forma de corrente alternada ($127 V_{ac}$, $220 V_{ac}$), cujo potencial foi referido ao barramento de corrente contínua;

Mostra-se na curva em verde contida a representação da potência entregue diretamente em corrente contínua;

O funcionamento global do sistema pode ser descrito pela curva em vermelho. Nessa verificou-se que YBRIDGEN demonstrou capacidade para alimentar cargas tanto em corrente contínua como em corrente alternada e, simultaneamente, gerenciar o fornecimento e recebimento de energia pelo acumulador.

O sistema conseguiu fornecer 819,52 W, embora a potência predominante de operação, apresentada nos testes de desenvolvimento do MCC1 tenha sido de 704,55 W.

Figura 25 – Ensaios no HYBRIDGEN para avaliar a sua capacidade de suprir, simultaneamente, cargas em 12 V_{cc} , 127 V_{ca} , 220 V_{ca} , bem como absorver energia do Acumulador, quando as solicitações da carga foram elevadas, e carregá-lo em momentos de demanda baixa.

Além dos ensaios de potência foram desenvolvidos ensaios de potencial, e de corrente, para avaliar diversas propriedades do sistema, mas principalmente, como se manifesta a variação do potencial devido ao recebimento e ao fornecimento de energia ao acumulador, e como se desenvolve a ativação dos sítios reacionais do MCC1, bem com o desempenho geral do acumulador e do MCC1.

Iniciou-se a análise dos resultados pelo estágio de ativação dos sítios reacionais. Foi mostrado na curva cor de rosa, da figura 26, que fornecimento de energia pelo MCC1 encontrava-se abaixo do valor desejado, indicando que o processo de ativação dos sítios reacionais ainda não estavam completos, mas que a ativação foi ocorrendo gradativamente. Observou-se que quando o ensaio aproximou da densidade de corrente de 381,94 mA cm^{-2} (704,55 W) a geração de energia elétrica já estava em um patamar bem próximo ao valor desejado, indicando com isso, que o estágio de ativação dos eletrodos encontrava-se relativamente avançado, mas ainda estava incompleto.

A curva em preto apresentou um estágio de ativação considerado completo,

mas sem que os testes prosseguissem além de $381,95 \text{ mA/cm}^2$ ($722,7 \text{ W}$).

Já a curva em vermelho, mostrada na figura 26, apresentou um estágio de ativação que foi considerado completo, com o HYBRIDGEN conectado ao acumulador.

Figura 26 – Resultados dos ensaios de potencial por densidade de corrente, no HYBRIDGEN, em diversas oportunidades, com diferentes estágios de ativação dos eletrodos do MCC1.

O ensaio do HYBRIDGEN ocorreu, sem problemas, até $444,44 \text{ mA cm}^{-2}$ ($819,52 \text{ W}$), ainda na curva vermelha, devido a contribuição do acumulador, que forneceu energia à carga nos momentos em que o MCC1 não dispunha de potência suficiente para atender a elevada demanda de energia, na carga.

Pode ser observado que para o trecho do ensaio no qual o HYBRIDGEN carregou o acumulador, a curva em vermelho se posicionou abaixo da curva em preto, mas de maneira oposta, quando o acumulador forneceu energia para a carga, a curva em vermelho se posicionou acima da curva em preto, justamente em uma região da curva onde houve elevada solicitação de corrente pela carga, entretanto, o HYBRIDGEN não conseguiu sustentar o fornecimento devido à limitada capacidade do acumulador utilizado no ensaio (45 Ah , 12 V ; $0,54 \text{ kWh}$).

A curva em azul apresentou o ensaio do HYBRIDGEN ocorrido em um estágio de ativação que se considerou completo, e para fins de comparação com o ensaio em vermelho foi desenvolvido desconectado do acumulador. Nesse ensaio o teste foi conduzido até $520,83 \text{ mA cm}^{-2}$ ($900,75 \text{ W}$), mas com pequena permanência, não permitindo afirmar, em caráter conclusivo, se o sistema poderia suportar a carga por muito tempo.

Foi possível mostrar, tomando como base os experimentos mostrados, que o HYBRIDGEN pode fornecer potência elétrica, de acordo com as necessidades da carga, em um montante superior à capacidade da sua principal fonte geradora de energia, que é o MCC1.

Para atender a essa aplicação é necessário dimensionar adequadamente o sistema acumulador, como pode ser visto na tabela 8, e nas equações 16 a 21 da Seção 4.4. Essa característica é essencial para a aplicabilidade do HYBRIDGEN em sistemas de terceira geração de energia elétrica híbrido, composto por um módulo de células a combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido.

Foi mostrado para o MCC1 e o acumulador a grande capacidade de integração de fontes de energia pelo HYBRIDGEN, mostrando o seu caráter multipropósito, ao poder receber alimentação da célula a combustível, do acumulador e de outras fontes de energia, bastando para tal, pequenas adaptações

Então, os benefícios da inclusão do conversor cc-cc no HYBRIDGEN entre o MCC1 e o barramento de força, pode ser avaliado como viável, já que a elevação do potencial até o valor desejado, via controlador, conforme mostrado na figura 21, permitirá converter e acumular energia elétrica gerada numa faixa de potenciais abaixo de $14,1 \text{ V}$, sendo um componente fundamental na melhoria da eficiência de conversão, embora não tenha impedido que o sistema funcione e, portanto foi possível projetar e montar o HYBRIDGEN na configuração híbrida; demonstrar a capacidade e características para promover a carga do acumulador de 45Ah , 12V , com ou sem a presença do conversor cc-cc, como mostrado na figura 25, fazer os testes com carga como os que ocorreram no HYBRIDGEN, no valor de $819,52 \text{ W}_e$, nos potenciais de 12 V_{cc} , 127 V_{ac} e 220 V_{ac} , simultaneamente, com 41% da carga, inicialmente prevista, conforme mostrado na figura 25. Esse resultado encontra-se abaixo do esperado devido à limitação no sistema de refrigeração (ventilado) do MCC1, bem como a limitada capacidade do acumulador utilizado para os testes. Entretanto o HYBRIDGEN, mesmo assim, conseguiu mostrar o seu potencial.

5.5 Análise de Estabilidade

Ao conceber um sistema de controle com realimentação, geralmente é necessário determinar se o sistema de malha fechada será estável. O critério de estabilidade de Nyquist foi baseado nos métodos, respectivamente de resposta em frequência pelo Teorema do Mapeamento e Lugar das Raízes (DESOER, 2009).

Foi concebida como uma técnica gráfica para a determinação da estabilidade de um sistema e pode ser aplicada a sistemas definidos como funções irracionais, tais como sistemas que provocam atrasos entre os sinais de saída, em relação ao sinal de entrada (DESOER, 2009).

O teste de estabilidade Nyquist fornece uma indicação para a avaliação de estabilidade do sistema, a partir do conhecimento de seus componentes, ou seja, se o sistema é estável ou instável, bem como a necessidade modificar um sistema instável para ser estável. Entretanto, é restrito a sistemas lineares invariantes no tempo (SLIT). Quando há necessidade de analisar sistemas não lineares um artifício deve ser utilizado para modificar um sistema não linear para se comportar como um sistema SLIT, ou sistemas SLIT sob determinadas circunstâncias, ou seja: uma análise de estabilidade relativa. Também, a estabilidade de um SLIT é uma característica do sistema e não depende dos sinais de teste ou mesmo da entrada ou excitação do sistema. As raízes da equação característica do sinal de entrada não afetam a estabilidade do sistema (DESOER, 2009).

A estabilidade de um sistema SLIT pode ser determinada a partir da localização das raízes da equação característica no plano complexo (s), ou polos de malha fechada. Então a característica básica da resposta transitória de um sistema de malha fechada depende essencialmente da localização dos polos de malha fechada, como mostrado na figura 27. É importante, então, que se saiba como os polos de malha fechada movem-se no plano complexo (s), à medida que o ganho da malha varia (OGATA, 2011).

Na figura 8 foram mostradas as equações 14 e 15, da seção 3.4, respectivamente, o diagrama de blocos e as equações representativas de um sistema de controle, denominado de malha fechada, onde o sinal de saída realimenta, por intermédio de $H(s)$, a entrada $R(s)$. A equação 14 representou

matematicamente o sistema de malha fechada, e a equação 15 representou a equação característica da equação 14.

Os polos de malha fechada são as raízes da equação característica. Um método para a determinação das raízes de uma equação característica se chama de método do lugar das raízes de Nyquist, e permite que as raízes da equação característica sejam representadas, graficamente, para todos os valores de um parâmetro do sistema, normalmente a variação do ganho entre zero e infinito (OGATA, 2011).

A equação 18, aqui renomeada de equação 52, representou a função de transferência de malha fechada obtida para o sistema conversor cc-cc estudado, e para a qual foi feita a análise de estabilidade, pelo critério do lugar das raízes de Nyquist. Então esse sistema de malha fechada será estável se as raízes da sua equação característica se situarem no semiplano esquerdo do plano (s), no domínio da frequência complexa (OGATA, 2011).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\Delta i(s)}{\Delta d(s)} = \frac{s \cdot 0,0517 + 14,4}{s^2 \cdot 919,69 \cdot 10^{-6} + s \cdot 508,379 \cdot 10^{-6} + 0,1191} \quad (52)$$

Logo, a equação característica da equação 52 é o polinômio igualado a zero, que se encontra no denominador.

Mostram-se na figura 27 as raízes da equação característica da equação 52, apresentada na forma de dois números complexos, o que denota a sua característica de função irracional, onde tais sistemas possuem a característica intrínseca de provocar atrasos entre os sinais de saída em relação ao sinal de entrada (DESOER, 2009).

Esses dois polos de malha fechada, complexos conjugados, localizam-se no semiplano esquerdo do plano (s), como mostrados numericamente na relação 53, e na forma de dois pontos de um lugar geométrico, na figura 27.

$$\text{polos } p = [-276,61 + 230,19i; -276,61 - 230,19i] \quad (53)$$

Então, quando as raízes da equação característica localizam-se no semiplano

esquerdo do plano (s), como mostrado na figura 27, pode-se afirmar que o sistema

conversor cc-cc, de onde essa equação foi extraída, é estável.

Figura 27 – Método Gráfico do Lugar das Raízes da Equação Característica de Nyquist, aplicado ao Modelo Matemático, mostrado na Equação 52, para analisar a Estabilidade do Sistema Conversor cc-cc.

Mostra-se na equação 54 a função de transferência de malha fechada, que representa o conversor cc-cc, onde foi aplicado um ganho de valor 0,001, incidindo sobre a equação 52.

$$G_{0,001}(s) = \frac{51,7 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,0144}{919,69 \cdot 10^{-9} \cdot s^2 + 508,379 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,1191} \quad (54)$$

A afirmação de estabilidade para o sistema representado pela a equação 52, pode ser estendida, também para a equação 54, pois possuiu a mesma equação característica de malha fechada que a equação 52, anteriormente mostrada,

e portanto, as mesmas raízes mostradas na equação 53.

O mesmo processo de gênese ocorre com a as equações mostradas nas equações 55 e 56, onde foram aplicados ganhos, respectivamente de valor 0,005 e

0,010 incidindo sobre a equação 52.

$$G_{0,005}(s) = \frac{258,5 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,0720}{919,69 \cdot 10^{-9} \cdot s^2 + 508,379 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,1191} \quad (55)$$

$$G_{0,010}(s) = \frac{517 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,1440}{919,69 \cdot 10^{-9} \cdot s^2 + 508,379 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0,1191} \quad (56)$$

Os sistemas definidos pelas equações 54 a 56 possuem funções de transferência tipo irracionais, onde ocorrem atrasos entre os sinais de saída em relação ao sinal de entrada. Pode-se afirmar, também que foram estáveis após a utilização da técnica gráfica do lugar das raízes de Nyquist.

A análise de estabilidade pode ainda ser executada para prever o seu comportamento ao considerar pontos específicos de operação do sistema conversor.

Isso pode se feito ao aplicar sinais de entrada de teste no sistema de energia, mesmo na ausência do sistema físico.

O modelo matemático do sistema, mostrado na equação 36, pode ser utilizado para essa finalidade (OGATA, 2011). Assim, com a utilização do modelo, fez-se a correlação entre as características das respostas do sistema de energia a um sinal de teste, e extrapolou o resultado, assumindo que o sistema real iria ser capaz de se comportar de forma equivalente, como mostrado na apresentação gráfica das figuras 21 e 22.

As perturbações foram realizadas com os sinais de teste função degrau e função impulso, e a variação transitória de potencial de barramento se comportou de forma satisfatória, retornando rapidamente ao patamar inicial. O sistema estabilizou-se, para os testes de ganho, mostrados na relação 38, e tiveram as apresentações gráficas mostradas nas figuras 21 e 22, onde todos os valores puderam atender aos requisitos de operação do sistema de energia.

Estudou-se a análise de estabilidade do sistema conversor cc-cc, além da técnica gráfica do lugar das raízes de Nyquist, a técnica inserida no Teorema do Mapeamento de Nyquist, por intermédio do modelo matemático, mostrado na equação 52.

Nessa técnica a estabilidade do sistema de malha fechada é avaliada pelo

contorno de todo o semiplano direito de (s), no sentido horário, com a frequência (w) variando de $-\infty$ a $+\infty$, no eixo imaginário (jw), (percurso de Nyquist), e no percurso não poder haver envoltimentos da origem da equação característica 36. Nessa situação não haverá polos de malha fechada e o sistema será estável, conforme mostrado na figura 28 (OGATA, 2011).

Na figura 28 foi mostrado que o conversor cc-cc é estável pela representação gráfica do percurso de Nyquist da equação característica de malha fechada 15, pois não há envolvimento da origem. Analisar graficamente o envolvimento da origem é o mesmo que o envolvimento do ponto $(-1 + j*0)$ pelo lugar geométrico da equação 57, (OGATA, 2011).

Figura 28– Método Gráfico de resposta em frequência pelo Teorema do Mapeamento de Nyquist, aplicado ao Modelo Matemático, mostrado na Equação (52), para analisar a Estabilidade do Sistema Conversor cc-cc, também denominado de Percusso de Nyquist para Análise de Estabilidade

$$G(s) \cdot H(s) = 0 \quad (57)$$

A análise do percurso de Nyquist, mostrado na figura 28 é aplicável às funções de transferência 54, 55, 56, pois possuem a mesma equação característica de malha fechada, mostrada na equação 52. Pode-se notar que existe uma variação, a menor, no ganho de corrente, mas as demais características

permanecem equivalentes. Tais avaliações mostraram que o conversor cc-cc é estável pela representação gráfica do percurso de Nyquist, tanto para a elevação do potencial do barramento, quanto para a avaliação do impulso de perturbação, e, portanto o conversor cc-cc é estável pelo teorema do mapeamento de Nyquist.

A resposta transitória ao degrau e ao impulso aplicado ao controlador foi suficientemente rápida e amortecida, como mostraram as figuras 21 e 22, e a capacidade demonstrada para elevar o nível do potencial produzido pelo HYBRIDGEN, traz enormes benefícios ao processo de acumulação de cargas e, portanto, na eficácia do sistema como um todo (ABNT-NBR14200, 1998).

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, desenvolveu-se, testou-se e comprovou-se a viabilidade técnica de um gerador de Eletricidade Híbrido de terceira geração construído com tecnologia 100% nacional, composto por um módulo de energia elétrica de célula a combustível tipo PEMFC e acumulador chumbo ácido, denominado HYBRIDGEN. Os testes no HYBRIDGEN demonstraram a sua capacidade de operar em modo contínuo, permitindo a operação sem interrupções, e de forma estável, carga com demanda variável e fator de carga inferior a 50%.

Um modelo matemático para um sistema elevador de potencial em corrente contínua, incluindo um módulo de célula a combustível tipo PEMFC, foi desenvolvido com sucesso, e mostrou-se bastante eficaz, por intermédio de simulação computacional, para simular o comportamento do conversor cc-cc. O programa Matlab7[®] foi utilizado para simular a atuação do conversor cc-cc, como elevador do potencial do barramento de corrente contínua, bem como, para verificar sua estabilização, para 14,4 V, após uma perturbação.

O Modelo cc-cc demonstrou ser estável ao utilizar as técnicas de Nyquist: Lugar das Raízes e Teorema do Mapeamento, bem como pelo uso das funções de Teste Degrau e Impulso.

A partir da concepção do HYBRIDGEN o país tem disponível uma contribuição tecnológica desenvolvida com tecnologia nacional, focado nos sistemas de terceira geração de energia elétrica híbrido, composto por um módulo de células a combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido.

APÊNDICE A

Rotinas de Programação para a simulação da estabilização do potencial de barramento no modelo do sistema conversor cc-cc

```
%Simulação da capacidade de estabilização do potencial de barramento pela
%função impulso
```

```
>>figure (14),t=[0:.0001:.030];d=0.001;num=[0 0.0517*d 14.4*d];den=[ 919.69*10^(-
9) 508.379*10^(-6) 0.1191]; impulse(num, den, t); grid, title('Resposta ao Impulso
Unitário Gd(s) = (s*0,0517*d+14,4*d)/{s^2*[919,69*10^(-9)] + s*[508,379*10^(-6)]
+0,1191}; d(s)= [0,001 0,005 0,010]'),hold on; d=0.005;num5=[0 0.0517*d
14.4*d];den5=[ 919.69*10^(-9) 508.379*10^(-6) 0.1191]; impulse(num5, den5,
t),hold on, d=0.010;num10=[0 0.0517*d 14.4*d];den10=[ 919.69*10^(-9)
508.379*10^(-6) 0.1191]; impulse(num10, den10, t), hold off
```

```
%Simulação da capacidade de elevação e estabilização do potencial de
%barramento pela função degrau
```

```
>>figure (15), t=[0:.0001:.030];d=0.001;num=[0 0.0517*d
14.4*d];den=[ 919.69*10^(-9) 508.379*10^(-6) 0.1191]; step(num, den, t); grid,
title('Resposta ao Degrau Gd(s) = ( s.0,0517.d +14.4.d) / {s^2.[ 919.69.10^-^9 ]+s.
[508.379.10^-^6 ]+0,1191}; d(s)= [0,001 0,005 0,010 ]'),hold on,d=0.005;num5=[0
0.0517*d 14.4*d];den5=[ 919.69*10^(-9) 508.379*10^(-6) 0.1191];step(num5, den5,
t),d=0.010;num10=[0 0.0517*d 14.4*d];den10=[ 919.69*10^(-9) 508.379*10^(-6)
0.1191];step(num10, den10, t),hold off, sys =tf(num,den), sys =tf(num5,den5),
sys=tf(num10,den10)
```

APÊNDICE B - ENSAIOS

Ensaio	Potencial (V) MCC1kWe (Leitura)	Potencial (100xV) MCC1kWe (Leitura)	Corrente (A) (Leitura)	Potência - (W) MCC1kWe (Calculada)	Potencial Início Trecho Linear (V)	Corrente Início Trecho Linear (A)	(R1) - Resistência		(R2) - Resistência de Ativação do MCC1 (mΩ)
							Ôhmica do MCC1 Trecho Linear (mΩ)	Ôhmica do Módulo Trecho Linear (mΩ)	
01	10,453	1,045,30	100,00	1,045,30	1,508,00	22,685	59,85	89,07	29,22
02	11,087	1,108,70	85,00	942,40	1,508,00	22,685	64,08	97,33	33,25
03	12,810	1,281,00	55,00	704,55	1,508,00	22,685	70,25	119,09	48,84
04	13,140	1,314,00	50,00	657,00	1,508,00	22,685	71,02	124,40	53,38
05	13,046	1,304,60	45,000	587,07	1,508,00	22,685	91,15	140,31	49,16
06	14,561	1,456,10	31,319	456,04	1,508,00	22,685	60,11	153,23	93,12
07	14,705	1,470,50	29,056	427,27	1,508,00	22,685	58,86	160,21	101,35
08	14,814	1,481,40	27,054	400,78	1,508,00	22,685	60,88	168,03	107,15
09	15,080	1,508,00	22,685	342,09	1,508,00	22,685	- - -		
Média	14,224	1,422,43	34,19	478,37	1,508,00	22,69	68,41	149,24	80,83

Ensaio	Potencial (V) 2MCC500	Potencial (100xV) 2MCC500	Corrente (A) (Leitura)	Potência - (W) MCC500	Potencial Início Trecho Linear (V)	Corrente Início Trecho Linear (A)	(R1) - Resistência Ôhmica do Módulo Trecho Linear (mΩ)	(R1) - Resistência Ôhmica do Módulo Trecho Linear (mΩ)	(R2) - Resistência de Ativação do 2MCC500 (mΩ)
01	11,160	1,116,00	100,00	1,116,00	1,590,00	15,00	55,76	85,40	29,64
02	11,840	1,184,00	84,46	1,000,00	1,590,00	15,00	58,45	93,06	34,61
03	11,480	1,148,00	100,00	1,148,00	1,590,00	15,00	52,00	82,20	30,20
04	12,860	1,286,00	77,76	1,000,00	1,590,00	15,00	48,44	87,96	39,52
05	12,060	1,206,00	80,10	966,00	1,590,00	15,00	58,99	95,38	36,39
06	12,100	1,210,00	89,92	1,088,00	1,590,00	15,00	50,72	84,52	33,80
Média	11,917	1,191,67	88,71	1,053,00	1,590,00	15,00	54,06	88,09	34,03

Dados técnicos de ensaios no MCC1 e MCC500

REFERÊNCIAS

- ABRECHT, P., ARUNGU-OLENDE, S.; FRANCIS, J. M.; GASPAR, D.; NASHED, W. N.; NWOSU, B. C. E.; ROSE, D. J. e SHINN, R. L. **Public Acceptance of Nuclear Power - Some Ethical Issues**. IAEA BULLETIN, VOL.19, NO.6. In: International Conference on Nuclear Power and Its Fuel Cycle, 2-13 May 1977, Salzburg, Austria.
- AHMED, A. **Power Electronics for Technology**. Ed. 2000. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; US 427p. ISBN: 0132310694.
- ANDERSEN, R. L. **Sistema de Interligação entre Módulos Geradores de Energia a partir de Células a Combustível tipo PEMFC**. 2006. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, área de concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Acumulador Chumbo-Ácido Estacionário Ventilado para Sistema Fotovoltaico - Ensaios**. Rio de Janeiro, 1998. (NBR 14200).
- BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL** 2011. Rio de Janeiro. Brasil. Ano base 2010: 266 p. CDU 620.9:553.04(81)
- BONIFÁCIO, R. N.; PASCHOAL, J. O. A.; LINARDI, M.; CUENCA, R. Catalyst Layer Optimization by Surface Tension Control During Ink Formulation of Membrane Electrode Assemblies in Proton Exchange Membrane Fuel Cell, **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 196(2011)4680-4685.
- BOSCH, **Manual de Baterias**, 26p, 2007, publicado por: Robert Bosch Ltda., São Paulo, SP, disponível: www.bosch.com.br, acesso: dezembro de 2011.
- BROWN, L. F., A Comparative Study of Fuels for On-Board Hydrogen Production for Fuel-Cell-Powered Automobiles, in: **International Journal of Hydrogen Energy**, Issue 4, Pages 26(2001)381–397.
- BUNN, M.; DIAKOV, A.; DING, M.; KATSUTA, T.; McCOMBIE, C.; RAMANA, M. V.; SUZUKI, T.; VOSS, S.; YU, F. e HIPPEL, F. V. **The Uncertain Future of Nuclear Energy**. A Research Report 9 of the International Panel on Fissile Materials, September, 2010. ISBN:9780981927572
- CETESB (São Paulo). **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2010** / CETESB. São Paulo: CETESB, 2011. 234 p. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103)
- CHANG, Y.; MAO, X.; ZHAO, Y.; FENG, S.; CHEN, H.; FINLOW, D.. Lead-Acid Battery Use in The Development of Renewable Energy Systems in China. In: **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 191 (2009) 176–183
- CHIAVENATO, IDALBERTO. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 8ª ed. São Paulo: Campus, 2011.

CHOI, W.; ENJETI, P.; HOWZE, J. W. Fuel Cell Powered UPS Systems: Design Considerations. **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 157(2006)1324-1332.

COOK, B. Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology. In: **Engineering Science and Education Journal**, published by Elsevier. 11(2002)205-216.

CUNHA, E. F. **Avaliação e Aplicação de Tecnologias de Células a Combustível tipo PEMFC Desenvolvidas no IPEN em um Módulo de 500W_e de Potência Nominal**. 2009. 135p. Tese (Doutorado em Ciências – Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/USP, São Paulo, Brasil.

DESOER, C. A.; VIDYASAGAR, M. **Feedback Systems: Input-Output Properties**. Edição: 2009. Editora: SIAM. Volume 55 de Classics in Applied Mathematics, 284p, ISBN 0898716705, 9780898716702.

DORF, R. C.; BISHOP, ROBERT H. **Sistemas de Controle Modernos**. Editora: LTC : 2009. Edição: 11a 724p, Brasil. ISBN: 9788521617143

FELTRE, R. **Físico Química**. Editora Moderna. 6. ed. 2004, 417p. São Paulo, Brasil

FERNÁNDEZ; VALENCIANO; TRINIDAD; MUÑOZ. The Use of Activated Carbon and Graphite for the Development of Lead-Acid Batteries for Hybrid Vehicle Applications, **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 195(2010)4458-4469.

GOPINATH, R.; ENJETI, P.N; et al. Development of a Low Cost Fuel Cell Inverter System with DSP Control. **Power Electronics**. IEEE Transactions on, 19(2004)1256-1262.

GRANOVSKII, M.; DINCER, I.; ROSEN, M.; Economic and Environmental Comparison of Conventional, Hybrid, Electric and Hydrogen Fuel Cell Vehicles, **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 159(2006)1186-1193.

GRANVILLE, W. A., SMITH, P.F., LONGLEY, W. R., **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral**, 703p. 1998. Edição Brasileira, Editora Científica, Rio de Janeiro, Brasil

HAJIZADEH, A.; GOLKAR, M. A.; Control of Hybrid Fuel Cell/Energy Storage Distributed Generation System against Voltage Sag, **International Journal of**

Electrical Power & Energy Systems, published by Elsevier, 32(2010)488-497.

HARFMAN-TODOROVIC, M. PALMA, L. ENJETI, P.A. Hybrid DC-DC Converter for Fuel Cells Powered Laptop Computers in: **Power Electronics Specialists Conference**. PESC(2006)1-5, 37th IEEE

HOOGERS, G. **Fuel Cell Technology Handbook**, chapter four, 2003, published by CRC Press. Washington, D.C. ISBN 0-8493-0877-1.

KINOSHITA, KIM. **Electrochemical Uses of Carbon**. 2001. Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA 94720, USA. Disponível: <http://electrochem.cwru.edu>. Acesso em: 06-05-2012.

KURZWEIL, P. Gaston Planté and his Invention of The Lead–Acid Battery—The Genesis of The First Practical Rechargeable Battery. **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 195 (2010) 4424–4434.

LAGO, J. N. **Tributos e Encargos na Tarifa de Energia Elétrica**. Dissertação Mestrado, UERJ. 2006.

LARMINIE, J. e DICKS, A., **Fuel Cell Systems Explained**. England: J. Wiley, 2nd ed., 2003, 433p, ISBN 0-470-84857-X

LIGURAS D. K.; GOUNDANI, K.; VERYKIOS, X. E. Production of hydrogen for fuel cells by catalytic partial oxidation of ethanol over structured Ni catalysts, in: **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, Issues 1–2, 130 (2004)30–37.

LINARDI, M.; **Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**. São Paulo, SP, Brasil: Altiber Editora, primeira edição, 2010. 152p. ISBN: 978-85-88098-52-7

LINDEN, DAVID; REDDY, THOMAS B. **Handbook of Batteries**, New York, USA: The McGraw-Hill Companies, terceira edição, 2002. 1454p.

MATHWORKS. **Matlab7/Simulink**: “Real-Time Workshop”, “TargetBox”, Matlab version 7, 2007, Simulink. Disponível: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em: 18 de outubro 2011.

NAHVI, M.; EDMINISTER, J.; **Schaum's Outline of Electric Circuits**, Fifth Edition, 504 pages, 2011. Publisher: MCGRAW-HILL. ISBN: 0071633723.

NOVAES, Y. R., **Contribuição para Sistemas de Processamento de Energia de Células a Combustível**. 2006. 288p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, área de concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo, SP, Brasil, Prentice Hall Editora, quinta edição, 2011. 824p.

PAVLOV, D. **Lead-Acid Batteries, Science and Technology**. published by Elsevier, 2011. ISBN:978-0-444-52882-7.

RASHID, M. H. **Power Electronics**. Academic Press. San Diego, California, USA. 2001. ISBN:012581650-2.

ROCCO, A. M, **Carros Elétricos e as Baterias de Íon Lítio: Estado Atual de Desenvolvimento e Perspectivas Tecnológicas**. em: XXII Fórum Nacional, INAE Instituto Nacional de Altos Estudos. (2009)192-213. Rio de Janeiro, Brasil.

SCHAECK, S.; STOERMER, A. O.; HOCKGEIGER. Micro-Hybrid Electric Vehicle Application of Valve-Regulated Lead–Acid Batteries in: Absorbent Glass Mat Technology: Testing a Partial-State-of-Charge Operation Strategy, **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 190(2009)173-183,

SERPA, L. A. **Estudo e Implementação de um Sistema Gerador de Energia Empregando Células a Combustível do Tipo PEMFC**. 2004, 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, área de concentração em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

SHENG, W. **Electrocatalytic Activities of Supported Pt Nanoparticles for Low-Temperature Fuel cell Applications**. 2010, 138p. Tese (Doutorado em Filosofia – Massachusetts Institute of Technology), USA.

SILVA, A. F.; BARRADAS, O. C. M. **Telecomunicações: Sistemas de Energia**. 1980. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos: Embratel. 1031p. ISBN: 852160024-0.

SZWARC, A.; Bioenergia e Meio Ambiente; In: **Conferência Nacional de Bioenergia - BIOCONFÉ**, 28 set. 2007, USP, São Paulo, Brasil. Anais Proceedings, USP, São Paulo, Brasil, painel 5. Disponível em: <<http://www.usp.br/bioconfe/downloads.htm>>. Acesso 18 out. 2011.

THOUNTHONG, P.; RAËL, S.; DAVAT, B. Energy management of fuel cell / battery / supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. **Journal of Power Sources**, published by Elsevier, 193(2009)376-385.

TUCCI, C. E. M. ; HESPANHOL I. ; CORDEIRO NETTO, O. M. **Gestão da água no Brasil**, Brasília, em: UNESCO, 2001. 156p. ISBN: 5-87853-26-0

VAIDYA, P. D.; RODRIGUES, A. E., Insight into Steam Reforming of Ethanol to Produce Hydrogen for Fuel Cells, in: **Chemical Engineering Journal**, Issue 1, 117(2006)39-49

WENDT, H.; LINARDI, M.; ARICÓ, E., Células A Combustível de Baixa Potência Para Aplicações Estacionárias, **Química. Nova**, 25(2002)470-476.

WEO - WORLD ENERGY OUTLOOK 2010, published by IEA International Energy Agency. 9 Rue de La Fédération 75739, Paris Cedex 15, France.

WEST_DEV LTD **PCB Artist Layout Software 1.3.3** Copyright© WestDev Ltd 1998-2010 Oak Lane Bredon Tewkesbury Gloucestershire GL20 7LR