

Análise do Afundamento de Tensão em Células a Combustível Hidrogênio utilizando Sistemas SCADA *internet-based*

Filipe Bispo Lima¹, José Medeiros de A. Júnior¹

¹Universidade Federal do Piauí (UFPI)

²Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

Teresina – Piauí – Brasil

filipebispo16@hotmail.com, jmjúnior@ufpi.edu.br

Cleyvan Soares de Oliveira², Camila Bispo Lima³

³Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

São Luís – Maranhão – Brasil

cleyvano@gmail.com, camilabl18@hotmail.com

Resumo — Este artigo apresenta uma análise sobre o afundamento de tensão em células a combustível hidrogênio causado pelo acúmulo de água interno, destacando as consequências e as principais técnicas de mitigação utilizadas para corrigir a tensão elétrica gerada através da oxido-redução entre hidrogênio e oxigênio. Adicionalmente, é proposto um sistema SCADA (*Supervisory of Control and Data Acquisition*) *internet-based* para realizar o despacho inteligente da energia produzida por grupos de geração distribuída cujas fontes primárias são oriundas do hidrogênio, de modo a atender aos consumidores em conformidade com a demanda requerida.

Palavras-chaves — Afundamento de tensão, Células a Combustível Hidrogênio, SCADA *internet-based*, Despacho Inteligente.

I. INTRODUÇÃO

A análise e correção dos distúrbios da qualidade da energia elétrica são essenciais para o fornecimento adequado de eletricidade a diferentes tipos de consumidores do Sistema Elétrico de Potência (SEP). A crescente inserção de cargas sensíveis aos surtos de tensão elétrica, por exemplo, demanda melhorias significativas nos índices de qualidade do suprimento energético de modo a resguardar a integridade dos equipamentos e não comprometer a vida útil do sistema (DUGAN, 2002).

Os fenômenos de interrupção, afundamento e elevação de tensão são relativamente comuns em redes de distribuição de energia elétrica e estão intimamente ligados à natureza das cargas usadas por consumidores residenciais, comerciais e industriais. Acréscimo de componentes harmônicas (devido ao uso de lâmpadas eletrônicas e a LED), diminuição do fator de potência (referente às cargas indutivas) e desequilíbrios nos parâmetros de tensão e frequência elétrica representam algumas consequências da mudança do perfil de consumo dos clientes conectados ao SEP (BOLLEN, 2000).

Outra questão relevante quando da avaliação dos parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) diz respeito às possíveis anomalias que grupos de Geração Distribuída (GD), recentemente inseridos na Matriz Energética Nacional, podem provocar em equipamentos e sistemas adjacentes. A resolução normativa 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) ampliou

recentemente pela resolução 687/2015 estabelece as condições gerais e de padronização dos sistemas de micro e minigeração distribuída pertencente aos consumidores que produzem parte da própria energia.

A partir de então qualquer consumidor pode ter instalado em suas propriedades pequenas centrais de produção de energia elétrica, solar ou de microturbinas eólicas, por exemplo, para atender ao próprio consumo e reduzir a quantidade de energia demandada da concessionária local. Dentre as vantagens dessa nova perspectiva, destaca-se a redução na conta de energia devido a menor dependência das fontes externas de suprimento e à possibilidade de repassar a parcela excedente produzida para fomentar outras demandas contratadas.

Os novos sistemas de microgeração elétrica distribuída são majoritariamente constituídos por grupos de geração solar fotovoltaica (cerca de 90% dos sistemas já conectados à rede). Apesar das vantagens oferecidas por essas novas filosofias de consumo que priorizam a produção descentralizada de energia, ainda existem empecilhos técnicos e econômicos que inviabilizam a expansão generalizada dos sistemas distribuídos. Ainda em se tratando de energia limpa, uma fonte primária de energia surge em caráter mais inovador e menos poluente, apresentando condições favoráveis de rendimento e autonomia elétrica: As células a combustível hidrogênio. O hidrogênio – elemento mais comum do universo – é apontado como centro da economia mundial dentro de 25 a 35 anos (GOMES, 2005).

As células de hidrogênio possuem eficiência energética considerável (cerca de 80% para a célula ideal) e favorecem a sustentabilidade ambiental com a emissão ínfima de poluentes. As células a combustível podem, futuramente, fazer parte da matriz distribuída de geradores em várias partes do mundo e melhorar a qualidade de energia, a capacidade de reserva dos sistemas, a confiabilidade no suprimento de energia para os novos e antigos consumidores e a segurança energética dos países. A viabilidade econômica e ambiental da tecnologia do hidrogênio é justificada principalmente se os meios para produzir o gás são provenientes de recursos renováveis (SULAIMAN; INAMBAO; BRIGHT, 2013).

A análise realizada neste artigo faz referência ao afundamento de tensão observado durante a fase momentânea

de acúmulo de água no catodo das células de hidrogênio, devido ao processo de óxido-redução para a produção de energia elétrica. Se o excesso de água não é removido do interior da célula, a tensão elétrica fornecida pode chegar a zero, configurando uma interrupção do suprimento energético. Dessa forma, as válvulas de purga (responsáveis por retirar o excesso de água) assumem tarefa fundamental no aumento da eficiência das pilhas de hidrogênio e contribuem para a imitigação de alguns dos principais distúrbios de qualidade de energia elétrica observados nas células. É importante destacar que embora os grupos de GD, cujas fontes primárias são oriundas do hidrogênio, não consigam atender as grandes demandas de cargas, essas pequenas usinas favorecem a regulação de tensão do sistema local em que estão conectados e são capazes de suprir parte da demanda média de consumo.

Para otimizar o uso do hidrogênio em conformidade com a demanda de energia elétrica, este trabalho também propõe o gerenciamento de duas células a combustível de 20 watts do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) através de um sistema *SCADA internet-based* e de dispositivos microcontroladores. A ideia é verificar o nível de tensão elétrica de cada célula e avaliar as situações em que ocorre afundamento de tensão ou interrupção de fornecimento de energia para realizar o despacho inteligente (*Smart Dispatch*, da sigla em inglês) segundo a disponibilidade das fontes primárias (hidrogênio) e de acordo com a necessidade de regulação de voltagem do sistema.

É apresentado o supervisório *SCADAWEB Hydrogen*. Um sistema de controle e aquisição de dados cuja programação utiliza linguagens da *WEB* (*HTML*, *CSS* e *JavaScript*) e a interface de comunicação é baseada no protocolo *ethernet* (FAN; CHEDED; TOKER, 2005). O *software* SCADA é responsável por analisar os limites de tensão de saída das células a combustível, verificar a viabilidade para os processos de conversão CC-CC (corrente contínua- corrente contínua) e conversão CC-CA (corrente contínua- corrente alternada) requeridos, além de realizar a conexão ou remoção das pilhas de hidrogênio ao barramento CC da Geração Distribuída.

II. AFUNDAMENTO DE TENSÃO NAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL HIDROGÊNIO

Os primeiros trabalhos com células a combustível iniciaram-se em 1839 com o cientista William Robert Grove. Após experimentos em laboratório, Grove constatou que a combinação com o hidrogênio e oxigênio resulta em água e energia elétrica. Nos testes iniciais foram utilizados eletrodos de platina sobrepostos por tubos contendo hidrogênio e oxigênio, que estavam imersos em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico. O cientista percebeu que surgia uma corrente elétrica no galvanômetro conectado aos terminais dos eletrodos de platina, porém a corrente produzida era muito baixa devido à pequena área de contato entre os reagentes.

Depois de várias tentativas de melhoramento com a substituição de eletrólitos, e a realização de testes de desempenho com a troca de eletrodos, combustíveis e elementos oxidantes, pesquisas de vários estudiosos chegaram à conclusão de que a célula a combustível hidrogênio representaria a solução mais atrativa aos

investimentos, devido ao alto rendimento (83% para a célula ideal) e à baixa emissão de resíduos danosos.

Segundo o módulo 08 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição) as variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Nas células de hidrogênio foi observada, principalmente, a classe de VTCD denominada afundamento momentâneo de tensão (AMT) ocorrido majoritariamente durante a fase de ativação catalítica das células a combustível ou quando do intempestivo acúmulo de água interno.

As células combustíveis mais utilizadas são compostas por dois eletrodos e por um eletrólito polimérico condutor de prótons. A entrada do combustível (hidrogênio) acontece pelo anodo e do oxidante (ar, oxigênio) através do catodo. A oxido-redução entre os compostos presentes no anodo e no catodo produz energia elétrica, calor e água. Na maioria das células, os eletrodos são revestidos por um catalisador de Platina, que irá acelerar as reações eletroquímicas e facilitar a formação de íons de hidrogênio (H^+).

É importante destacar que o eletrólito das células deve ser um isolante elétrico, para evitar um curto-circuito entre anodo e catodo, ao mesmo tempo em que deve ser um condutor protônico para permitir o transporte de cátions H^+ que se recombinarão com os íons do catodo. Da mesma forma como acontece nas baterias, nas células de hidrogênio ocorre conversão da energia química dos reagentes em energia elétrica sem a necessidade de partes rotativas ou queima de combustível.

A queda de tensão característica nas células a combustível hidrogênio é causada principalmente pelo excesso de água produzido no interior da célula após reação global de oxido-redução. O afundamento momentâneo de tensão pode comprometer o bom funcionamento dos dispositivos de conversão de energia a jusante (controlador de carga, conversor CC-CC e inversores de tensão). É nesse contexto que se destacam as válvulas de purga para remover o excedente aquoso e deslocar a reação global para o sentido de produzir mais energia elétrica.

Os elétrons resultantes das reações químicas fluem por um circuito externo e a energia associada aos portadores de carga é usada para atender a demanda energética requerida da célula. A maioria das pilhas a combustível existentes é classificada de acordo com o eletrólito utilizado. As células de membrana de troca de prótons (*PEMFC- Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) são as mais usadas na área automotiva e utilizam, na maioria dos casos, o Nafion[®] como eletrólito, que é um polímero condutor de cátions saturado com um líquido (SOUZA, 2009). Na figura 1 é mostrado o esquema de funcionamento de uma célula a combustível hidrogênio.

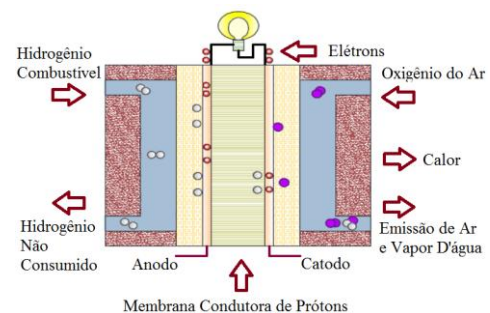


Fig. 1. Esquema de funcionamento de uma célula a combustível hidrogênio.

III. SISTEMA SCADAWEB HYDROGEN

A filosofia dos sistemas SCADA é baseada na interação dinâmica entre um sistema controlado e uma interface de monitoramento e obtenção de dados em tempo real de forma a munir as centrais de operação com informações relativas ao estado dos equipamentos e às manobras realizadas durante a inspeção do sistema. Plantas industriais, subestações de energia elétrica, sistemas de automação residencial e demais sistemas que requerem um controle sofisticado e completo, são constantemente sujeitos às melhorias proporcionadas com a implantação de interfaces de controle e aquisição de dados via software supervisorio (LI; SERIZAWA; KIUCHI, 2002).

Projetar um sistema de controle SCADA utilizando uma interface em linguagem WEB exige o conhecimento a respeito das sintaxes envolvidas no desenvolvimento do supervisorio e a definição de quais dispositivos de rede *ethernet* devem ser utilizados para compilar as informações repassadas via navegadores da rede WEB. Uma vantagem de se utilizar essa linguagem para desenvolver aplicações dinâmicas e úteis de sistemas automatizados, por exemplo, é a não necessidade da instalação de softwares adicionais para a execução dos *scripts* do supervisorio, qualquer Web-browser será capaz de fazer a leitura dos blocos gráficos do SCADAWEB. (MEDIDA; SREEKUMAR; PRASAD, 1998).

Outra vantagem desse tipo de sistema é devido ao uso do protocolo de comunicação ethernet, que permite o acesso remoto aos sistemas, seja via rede local (*intranet*) com o uso de roteadores sem fio, ou através da própria internet, possibilitando maior abrangência do controle e monitoramento das variáveis do sistema SCADA (ZECEVIC, 1998). Neste trabalho, é abordada uma estratégia de controle automático do despacho da geração de energia elétrica de um sistema renovável de produção energética, composto por duas células a combustível hidrogênio.

A potência elétrica será mensurada e realizar-se-á o acionamento ou desligamento das usinas em conformidade com a demanda requerida. O sistema deverá entender o quanto o afundamento de tensão da célula a combustível poderá comprometer o bom funcionamento dos conversores à montante da instalação e adicionar ou remover grupos de hidrogênio. Mediante a instalação de sensores de tensão elétrica contínua, será possível averiguar o comportamento da tensão do barramento da microrrede.

O supervisorio ganhou o nome SCADAWEB Hydrogen e durante sua programação e construção da interface utilizou-se as linguagens arduino, HTML, Javascript e CSS alocadas em um microcontrolador e um módulo *ethernet shield* arduino. Para o sistema projetado, o servidor da WEB é representado por uma placa *ethernet shield* acoplada a um arduino mega 2560, que assume um endereço IP (*Internet Protocol*) na rede local e pode fornecer as informações do sistema SCADA para qualquer dispositivo que tenha conexão com a intranet. Ao mesmo tempo em que o endereço é um requisito básico de comunicação do sistema, ainda serve como uma senha para permitir o acesso apenas de usuários autorizados. É recomendável que nos sistemas de supervisão, o arranjo das instalações monitoradas e plotadas no supervisorio sejam condizentes com o layout dos equipamentos da planta real (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

A ideia para o gerenciamento do despacho inteligente é desenvolver uma aplicação simples e fluida para o acionamento de dispositivos atuadores que serão responsáveis por inserir ou remover grupos de produção de energia segundo o comando das centrais de operação. Para isso, a tela do sistema SCADA foi munida de botões de padrão HTML cujo acionamento é realizado via cliques de *mouse* que enviam *strings* para o arduino e controlam o nível de tensão de saída do micro controlador.

O sistema ainda contém uma sinalização de acionamento que utiliza blocos em CSS (*Cascading Style Sheet*) que mudam de cor conforme o estado de acionamento das usinas. Se o grupo estiver ligado ao barramento CC então o bloco adquire cor verde. A cor vermelha sinaliza o bloqueio do relé atuador devido à queda da tensão gerada para valores abaixo de 12 volts e o bloco cinza indica que a fonte de energia foi desconectada do barramento. O operador da planta possui a informação prévia de que cada módulo de energia tem capacidade de cerca de 20 watts de potência e que o despacho deverá ser realizado mediante inspeção dos valores de tensão gerada no barramento de tensão contínua.

As fontes de energia alternativa serão complementares ao suprimento de energia elétrica do consumidor final que é atendido pela concessionária local de energia em uma tensão de 127 volts em tensão alternada e frequência de 60 Hz. Quando a potência demandada ultrapassar um valor pré-determinado o operador da planta de controle poderá acionar um ou mais grupos da geração distribuída de modo a reduzir a demanda por mais energia da distribuidora, economizar na conta de energia elétrica e favorecer a redução da emissão de poluentes.

Por exemplo, se apenas 20 watts de demanda de potência é requerida da instalação, teoricamente apenas um grupo de produção energética será necessário para compensar o consumo da carga e o operador da planta deverá escolher a fonte energética segundo a disponibilidade das fontes primárias de energia. Analogamente, para um consumidor fictício que possui 40 watts de capacidade instalada, dois módulos de energias renováveis de hidrogênio deverão ser acionados para atender a demanda deste consumidor. Na figura 2 é destacado o layout do supervisorio SCADAWEB Hydrogen.



Fig. 2. Layout do supervisorio SCADAWEB Hydrogen.

IV. METODOLOGIA E RESULTADOS

Para a análise da tensão gerada e a coordenação de uma ação de despacho inteligente dos grupos de geração distribuída baseados no hidrogênio é necessário conhecer aspectos importantes sobre a manutenção, operação e produção energética das células a combustível. O módulo de hidrogênio do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica da UFPI é composto por duas *stacks* de células a combustível de 20 watts cada. As células são do tipo PEM (Proton Exchange Membrane) e utilizam hidrogênio (99,995% de pureza) e oxigênio (ar, ambiente) como reagentes da oxido-redução. Durante a operação normal da célula é produzida uma tensão de cerca de 10 volts em corrente contínua entre os terminais de anodo e catodo. Na figura 3 é apresentada a forma de onda da tensão produzida por uma das células de hidrogênio do laboratório. Para a plotagem do gráfico foi utilizado um programa no *software* MATLAB®.

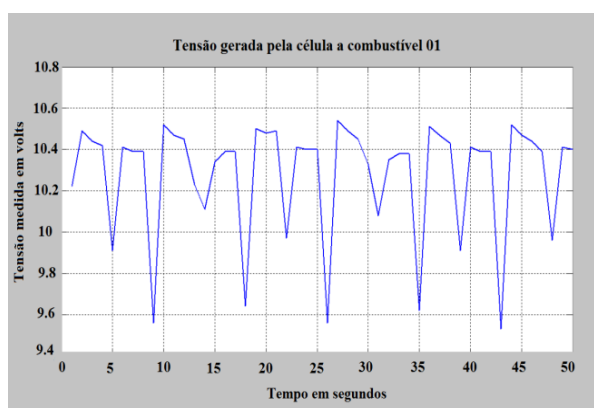


Fig. 3. Tensão gerada pela célula a combustível 01.

A forma de onda da tensão produzida pela célula de hidrogênio 02, conforme a figura 4 é similar ao que foi obtido com a primeira célula. O sistema ainda conta com controladores de carga que coordenam o processo de purga (retirada de água da célula) e válvulas de pressão para regular o suprimento de hidrogênio. O hidrogênio é armazenado na forma de hidretos metálicos, sendo, pois, o gás, adsorvido em uma superfície metálica que é sobreposta por várias camadas similares. Se o gás fosse armazenado no estado líquido seria necessária muita energia para leva-lo a $-253,4^{\circ}\text{C}$ e em estado gasoso seriam demandados sistemas muito espaçosos e de grande volume.

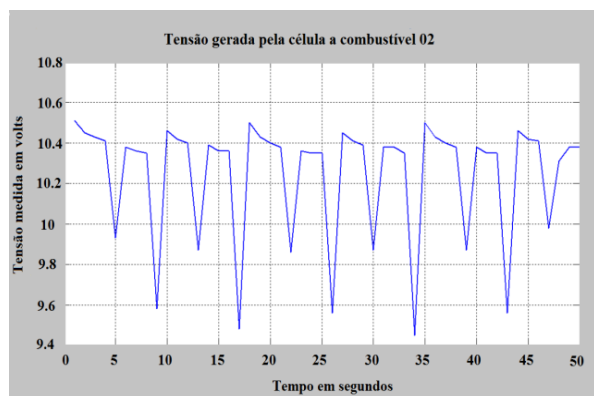


Fig. 4. Tensão gerada pela célula a combustível 02.

A montagem utilizada para fazer a medição de tensão e a respectiva plotagem do gráfico é mostrada na figura 5.

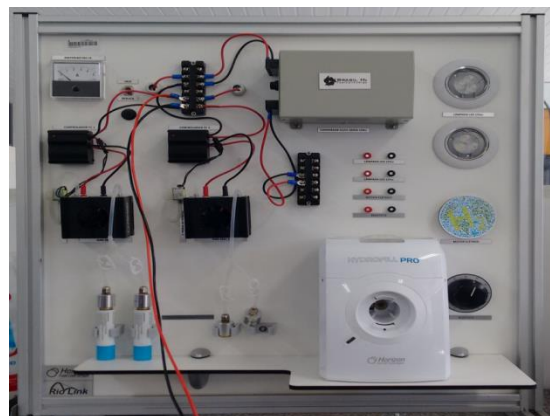
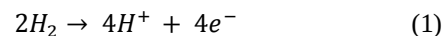


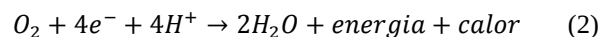
Fig. 5. Montagem do módulo de hidrogênio para medição da tensão elétrica gerada.

Quando a célula é alimentada com o hidrogênio, a oxido-redução e produção de energia são regidas pelas equações:

Reação de oxidação que acontece no anodo:



Reação de redução no catodo:



Entretanto, segundo os princípios de equilíbrio de *Le Chatelier* (1850-1936), todo sistema tende a se reajustar para favorecer a estabilidade. Se muita água é produzida no interior da célula, o equilíbrio da reação será deslocado para a esquerda, produzindo, portanto, menos água e energia elétrica. Retirar o excesso de água conduzirá a reação no sentido de maior produção de água, eletricidade e calor, aumentando a eficiência e melhorando o desempenho da célula. É nesse ponto que as válvulas de purga têm papel fundamental. Quando da análise da eficiência das células a combustível, foi mensurado um rendimento de aproximadamente 68% para a *stack* utilizada e constatou-se ainda, que a tensão de circuito aberto é aumentada à medida que a célula é hidratada e passa a atuar no modo de operação normal (região de ativação).

O processo de hidratação da célula a combustível pode ser acelerado mediante a adição de água destilada no terminal de saída de hidrogênio. Apesar de ser inovadora e pouco poluente, a tecnologia do hidrogênio ainda enfrenta desafios que dizem respeito à viabilidade técnica e econômica. Os eletrolisadores utilizados para a obtenção do hidrogênio com elevada pureza, consomem bastante energia elétrica e o uso destes equipamentos só é justificado se o suprimento energético for proveniente de fontes renováveis. O processo de reforma catalítica a vapor do gás metano é a principal fonte de produção de hidrogênio atual, sendo reduzida a emissão de poluentes em relação a outros meios de obtenção.

O módulo de hidrogênio possui um eletrolisador que produz hidrogênio a partir da água destilada ou deionizada. A água sofre o processo de eletrólise e decompõe-se em oxigênio e no hidrogênio que será armazenado nos cilindros de hidretos metálicos. Cada cilindro leva cerca de 5 horas

para ser carregado e consegue armazenar 10L de hidrogênio no estado sólido. O gás é adsorvido na superfície de uma liga metálica e após o carregamento total na estrutura do cilindro é adicionado um peso extra de 0,9g ao cilindro carregado (RIOLINK, 2005).

As células a combustível do módulo de energia são conectadas em série e a saída de tensão é conectada a um conversor CC-CC através de um circuito de medição, controle e monitoramento. O conversor CC é configurado para uma tensão de entrada entre 10 e 36 volts em corrente contínua, com 12 volts de tensão elétrica de saída. O valor de tensão contínua em 12 volts foi utilizado para manter o barramento da microrrede em uma tensão constante. No gerenciamento dos módulos de energia para o despacho inteligente da geração, um barramento CC interliga os grupos descentralizados e posteriormente a conversão CC-CA é realizada para atender uma carga em tensão alternada.

Existem basicamente três estados de polarização para as células a combustível hidrogênio. A polarização de ativação está relacionada à barreira de energia que deve ser superada para iniciar as reações químicas entre os reagentes. Na região de polarização ôhmica ocorrem perdas resistivas nas células e a quantidade de tensão elétrica perdida para que ocorra a condução de eletricidade varia quase que linearmente nesta região que é considerada a zona de trabalho da célula de hidrogênio. Já no estado de transporte de massa os reagentes são consumidos a taxas maiores do que eles podem ser fornecidos, acumulando mais água no interior da célula e reduzindo a tensão gerada.

Nas formas de onda de tensão das células de hidrogênio apresentadas nas figuras 3 e 4, destacam-se quedas de tensão de curta duração referentes à ativação catalítica através da técnica de curto-circuito e o respectivo aumento da tensão devido à hidratação constante da célula. Os grupos de hidrogênio podem ser conectados em série ou em paralelo conforme a necessidade energética e segundo a disponibilidade das fontes primárias. O sistema supervisor é capaz de reconhecer as principais situações de contingência referentes à redução da tensão produzida para que seja realizado o despacho inteligente da geração distribuída baseada no hidrogênio. Adicionalmente, pode-se realizar a interligação de quaisquer geradores ao barramento de tensão contínua mediante acionamento de comandos da interface do sistema *SCADAWEB Hydrogen*. A conexão entre as células a combustível foi realizada através de relés eletromecânicos simples e cuja comutação podia ser executada remotamente através de qualquer dispositivo com acesso à internet.

Para realizar a aquisição de dados em tempo real foi utilizado um microcontrolador *arduino mega 2560* associado a uma placa *ethernet shield* cujas entradas digitais receberam sinais de medição provenientes dos sensores de tensão e corrente elétrica. Os sensores de tensão foram conectados às células de hidrogênio e mediante um procedimento de linearização do sinal de entrada analógico medido, um valor digital foi repassado ao microcontrolador que ficou responsável por calcular os parâmetros elétricos do sistema e exibir tais valores na tela do supervisor através de uma rotina de programação *web* na linguagem *JavaScript*. Para a plotagem dos gráficos das tensões elétricas de cada célula a combustível, uma aplicação no *software* MATLAB® foi utilizada para fazer a leitura da porta *ethernet* do arduino e apresentar os resultados conforme as figuras 3 e 4.

Na figura 6 são mostrados os principais componentes periféricos que viabilizaram o controle e a aquisição de dados do sistema *SCADAWEB Hydrogen*. Da esquerda para a direita destacam-se um roteador *wifi*, um *arduino mega* acoplado a uma placa *ethernet*, um sensor de tensão contínua, um sensor de corrente contínua e um módulo relé atuador.



Fig. 6. Componentes requeridos para o *SCADAWEB Hydrogen*.

Para avaliar o desempenho das células de hidrogênio mais satisfatoriamente, um ensaio de variação de carga elétrica foi realizado para cada uma das *stacks*. O procedimento para análise da corrente elétrica frente à mudança da carga conectada a um módulo de produção energética é muito útil para o Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (*MPPT*, da sigla em inglês) do sistema e para a validação do rendimento associado ao gerador de energia considerado. Na tabela I são destacados os resultados para a célula 01.

TABELA I. COMPORTAMENTO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL 01 FRENTE À CARGA.

Tensão Elétrica da PEMFC 01 (V)	Corrente Elétrica (A)	Carga (Ohm)
10,42	1,30	10
9,67	1,41	20
8,95	1,52	30
8,19	1,67	40
7,44	1,83	50
6,59	2,04	60
5,84	2,33	70
5,10	2,65	80
4,34	3,12	90
3,55	3,84	100

Na tabela II são apresentados os resultados de medição de corrente elétrica para a segunda célula a combustível.

TABELA II. COMPORTAMENTO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL 02 FRENTE À CARGA.

Tensão Elétrica da PEMFC 02 (V)	Corrente Elétrica (A)	Carga (Ohm)
10,28	1,32	10
9,51	1,43	20
8,76	1,55	30
8,02	1,69	40
7,25	1,87	50
6,53	2,08	60
5,79	2,34	70
5,02	2,70	80
4,25	3,19	90
3,48	3,90	100

Os testes de medição de corrente elétrica utilizaram as células em estado de polarização linear ou ôhmica. Esse

estado de polarização é atingido quando a membrana condutora de prótons está devidamente hidratada e a taxa de consumo dos reagentes hidrogênio e oxigênio do ar é moderada. A máxima transferência de potência para ambas as células ocorre para uma carga conectada de 20 *ohms*. Nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica munidos de grupos de Geração Distribuída (GD) baseados nas Células a Combustível Hidrogênio, os fenômenos de Afundamento de Tensão podem ser corrigidos mediante a inserção de novos blocos de geração de energia ou através da remoção de cargas menos prioritárias do sistema. É nesse contexto, por exemplo, que o sistema auxiliar para despacho energético proposto neste artigo pode contribuir para manter a tensão fixa no barramento de corrente contínua da GD e otimizar a utilização das fontes primárias de energia.

Na figura 7 é destacada a oscilografia do Relé de Gerenciamento de Alimentação (*Feeder Management Relay*) *MICOM P142* da *Schneider Electric*. A partir da medição no transformador de Potencial (TP) do equipamento é possível verificar a região de transição referente à correção do Afundamento de Tensão na saída do processo de conversão CC-CA para atender ao consumo de uma pequena carga em corrente alternada. Através da análise da oscilografia constata-se que o supervisório *SCADAWEB Hydrogen* foi capaz de realizar o despacho inteligente dos grupos de hidrogênio e manter o bom funcionamento do controle de purga das células a combustível para regular a tensão elétrica contínua do barramento da GD e, conseqüentemente, favorecer o processo de conversão CC-CA. Evidentemente, a metodologia exposta neste trabalho pode facilmente ser aplicada em sistemas maiores e de uso comercial.



Fig. 7. Oscilografia da correção do Afundamento de Tensão.

V. OBSERVAÇÕES FINAIS

Enfim, a metodologia proposta para a análise do afundamento de tensão característico das células a combustível hidrogênio, mostrou-se viável e de vasto potencial para uso em sistemas de gerenciamento de energia. O sistema *SCADAWEB Hydrogen*, utilizado para medir a tensão elétrica e realizar o despacho inteligente da energia produzida pelos grupos de hidrogênio, possui portabilidade, acesso remoto e pode mitigar os efeitos da queda de tensão sobre o barramento de tensão contínua da Geração Distribuída, contribuindo positivamente no processo de conversão CC-CA.

A redução de tensão de curta duração observada na fase de ativação catalítica via técnica de curto-circuito não

prejudicou o bom funcionamento do conversor *Boost* do módulo de hidrogênio que consegue estabilizar a tensão de saída no valor de 12 *volts* em corrente contínua. Porém, o excesso de água no interior da célula a combustível pode anular a tensão resultante da oxido-redução, provocando perda de capacidade de reserva ao sistema e queda do potencial de despacho da energia elétrica demandada pelo sistema. A pressão de entrada do hidrogênio na célula também é fator determinante para a produção de tensão em valores nominais.

Como trabalhos futuros, pode-se desenvolver uma interface mais completa para o supervisório *SCADAWEB Hydrogen*, através de *scripts* dinâmicos e de rápida execução. Projetar mecanismos de recomposição automática do sistema e/ou técnicas de inteligência computacional para reconhecer padrões de consumo e os níveis das diferentes grandezas elétricas, enriqueceria de forma significativa este artigo. Adicionalmente, a inclusão de novos grupos de geração distribuída (oriundos de outras fontes primárias) aumentaria a capacidade de reserva operacional, de modo a atender um maior número de consumidores e conferir mais robustez ao sistema contra o afundamento de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 08 - Qualidade da Energia Elétrica.
- [2] FAN, R.; CHEDED, L.; TOKER, O. Internet-based scada: a new approach using java and xml. *Computing Control Engineering Journal*, v. 16, n. 5, p. 22 – 26, oct.-nov. 2005. ISSN 0956-3385.
- [3] GOMES NETO, Emilio Hoffmann. *Hidrogênio Evoluir sem Poluir*. Brasil H2 Fuell Center, 2005.
- [4] LI, D.; SERIZAWA, Y.; KIUCHI, M. Concept design for a web-based supervisory control and data-acquisition (scada) system. In: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*. IEEE/PES. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 32 – 36 vol.1.
- [5] MEDIDA, S.; SREEKUMAR, N.; PRASAD, K. SCADA-EMS on the Internet. In: *IEEE. Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD'98. 1998 International Conference on*. [S.l.], 1998. v. 2, p. 656–660. ISBN 0780344952.
- [6] MORAES, Cícero Couto de.; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. *Engenharia de Automação Industrial – 2º edição* – Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [7] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, 2000
- [8] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, Surya Santoso & H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2nd Edition, 2002
- [9] RIOLINK, Manual da Estação de Estudos em Energias Renováveis e Células a Combustível Hidrogênio (EEERH2). – BRASIL H2 FUEL CELL ENERGY, 2005.
- [10] SOUZA, Mariana de Mattos Vieira Mello. *Tecnologia do Hidrogênio*. Synergia, 2009.
- [11] SULAIMAN, A. INAMBAO, F. and G. BRIGHT. Development of Solar Hydrogen Energy for Mobile Robots, *Proceedings of 6th Robotics and Mechatronics (RobMech) Conference*, October 30-31, 2013, Durban, South Africa, pp. 14-19, 2013
- [12] ZECEVIC, G. Web based interface to scada system. In: *Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 2, p. 1218 –1221 vol.2.