

## Estratégia Operacional para Geração de Energia Elétrica com Pilhas de Células de Combustível em Redes de Distribuição

L. N. Canha; V. A. Popov; F. A. Farret  
Universidade Federal de Santa Maria  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Campus Camobi, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil  
E-mail: [lncanha@ct.ufsm.br](mailto:lncanha@ct.ufsm.br)

**Palavras-chave** - célula de combustível; cogeração; curvas típicas de carga; geração distribuída; horário de ponta.

**Resumo** - Este trabalho apresenta propostas para determinar os parâmetros ótimos das pilhas de células de combustível de baixa temperatura (PEMFC) a serem instaladas na rede de distribuição para o gerenciamento da curva de carga de consumidores residenciais, comerciais ou industriais com especial interesse no uso conjunto de energia elétrica e térmica. A partir da seleção dos possíveis locais para a instalação das pilhas, é feito o levantamento das curvas de carga dos transformadores de distribuição com base em informações operacionais tais como curvas típicas de carga e consumo mensal de energia para cada grupo de consumidores. As curvas de carga, assim determinadas, são utilizadas nos algoritmos para determinação do tamanho das pilhas em cada caso específico.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição rurais ou urbanos no Brasil são projetados, em sua quase totalidade, sem levar em conta a possibilidade de geração própria de energia pelo consumidor. A introdução de fontes distribuídas de geração, armazenamento e injeção de energia na rede de distribuição pode implicar em significativo impacto no fluxo de potência, consumo de energia, perdas, níveis de tensão nas redes de média e baixa tensão e confiabilidade do suprimento de energia.

Nos últimos anos, uma série de fontes de geração e armazenamento de energia tem-se apresentado como proposta viável para o gerenciamento de energia das concessionárias e consumidores. Tais sistemas podem representar uma boa opção para o dilema entre atender o aumento da demanda de modo satisfatório e respeitar as restrições ambientais impostas. Em particular, as células de combustível (FCs) podem operar como parte de um sistema de cogeração em virtude de suas altas eficiências. Por outro lado, como um sistema distribuído de armazenamento e geração de energia, as FCs podem contribuir para a redução dos picos de demanda e aumento do fator de carga das instalações. A maioria das concessionárias apresenta demanda muito menor na madrugada do que durante o dia e início da noite. Com isto, é possível obter uma significativa redução nos custos com energia a partir da utilização de sistemas de geração

e armazenamento de energia conforme apresenta este artigo.

A proposta deste trabalho é discutir o uso de células de combustível para o gerenciamento de carga das concessionárias distribuidoras de energia. A FC converte o hidrogênio puro, ou um combustível rico em hidrogênio, em eletricidade e calor através de uma reação eletroquímica. Seu princípio de operação é bastante simples, porém, uma série de fatores, como temperatura, umidade, pressão e concentração dos reagentes (oxigênio e hidrogênio) têm grande influência na tensão de saída e, conseqüentemente, no rendimento da FC, conforme apresenta [1]. Pelo lado da fonte de combustível para a FC, o hidrogênio pode ser obtido de diversas maneiras, entre elas a eletrólise que, como sub-produto, fornece também oxigênio com grande grau de pureza. O rendimento do processo de eletrólise é alto (>70%) e, dependendo da tarifa em vigor, o custo do hidrogênio produzido fora do horário de ponta pode torná-lo viável. Mesmo que as eficiências elétricas não sejam muito altas, o adequado aproveitamento do rejeito térmico da FC pode colaborar para a viabilidade do projeto.

Sistemas de armazenamento e geração distribuída de energia podem ser instalados nas dependências dos consumidores. Contudo, há uma série de critérios para o projeto e operação adequados dependendo do tipo de benefício que pode ser gerado. Tais sistemas podem aumentar o fator de carga, reduzir perdas em transmissão e distribuição, melhorar a confiabilidade, controlar os níveis de tensão, reduzir os custos com a energia, etc. Quando um consumidor decide instalar um sistema deste porte, em geral, a economia é o fator mais importante. É difícil encontrar alguma instalação residencial, comercial ou industrial que não tenha associado o consumo de energia elétrica e térmica. Portanto, a vantagem econômica deste sistema pode advir do efetivo uso da cogeração aliada às estratégias de redução dos picos de demanda.

Em geral, o alto custo dos sistemas com FC são o principal obstáculo para a ampliação do uso desta tecnologia. Por outro lado, as companhias distribuidoras de energia têm interesse na redução das perdas, aumento da estabilidade e confiabilidade dos sistemas, melhorias no controle de tensão e redução dos picos de demanda. Por estas razões, é importante que a concessionária conheça tanto o nível adequado de potência quanto o

melhor local para instalação da pilha na rede de distribuição.

Outro fator a ser levado em conta além da alta eficiência energética das FC é o fato de sua operação não colaborar para o aumento das emissões de gases poluentes. Como se pode verificar, tanto os consumidores como as concessionárias e o governo têm interesses idênticos no uso de sistemas distribuídos de energia utilizando FC. A solução para incentivar o uso destes sistemas pode estar na união de todas as partes interessadas.

A curva de carga geral de uma companhia distribuidora de energia é composta pelas curvas individuais de demanda de cada unidade consumidora. Desta forma, a redução dos picos de demanda de grandes consumidores implica em uma grande contribuição para a redução dos picos de demanda das concessionárias. Por outro lado, muitos consumidores residenciais, considerados individualmente como pequenas cargas podem, da mesma forma, contribuir significativamente para a redução dos picos de demanda, por exemplo, através da eliminação dos chuveiros elétricos que são um grande problema no Brasil.

Este artigo apresenta algoritmos para estimar o tamanho ótimo de sistemas com FCs. Primeiro, a equipe de planejamento e operação da concessionária deve apontar as possíveis localizações dos transformadores de distribuição (TD) para a instalação das FCs com o ponto de vista de segurança e uso simultâneo de energia elétrica e térmica. Para os transformadores selecionados, é necessário o levantamento das curvas de carga a partir de informações operacionais tais como curvas típicas de carga e consumo mensal de energia para cada grupo de consumidores. As curvas de carga, assim determinadas, servirão para a determinação do tamanho da pilha a ser utilizada em cada caso.

Por fim, o local ótimo para a instalação da pilha, dentre todos os possíveis transformadores de distribuição, é determinado considerando uma série de características operacionais, tais como: perdas de energia, confiabilidade, manutenção dos níveis de tensão e investimentos.

A pilha assim designada tem condições de operar com potência constante ou variável durante o horário de ponta ou quaisquer outros horários determinados pela concessionária. Para cada situação, um método específico deve ser utilizado. A potência da pilha pode ser determinada a partir de algoritmos elaborados para tornar a curva de carga o mais plana possível, sob certas restrições. Esta premissa parte da idéia de que os sistemas de geração distribuída utilizando FCs podem ser uma alternativa atrativa no futuro próximo, embora a introdução de tais sistemas na rede de distribuição deva ocorrer de forma gradativa, em virtude dos altos investimentos envolvidos. Uma única pilha instalada não representa alteração significativa na rede de distribuição, porém uma série de pilhas distribuídas no sistema implica em uma influência significativa nos níveis de tensão, perdas e confiabilidade das concessionárias. Assim, a

idéia de se tornar o mais plana possível a curva de carga dos consumidores, sob determinadas restrições, facilita o gerenciamento da carga dos alimentadores, que passam a contar com a redução progressiva de seus picos de demanda a partir da instalação das FCs. As seções seguintes discutem alguns dos procedimentos adotados para cada caso.

## 2. ESTIMATIVA DAS CURVAS DE CARGA DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Vários algoritmos podem ser utilizados para a construção da curva de carga de transformadores de distribuição. A escolha depende da distribuidora de energia e, principalmente, de como os dados são elaborados no processo de construção das curvas típicas de carga para dias úteis, sábados e domingos. Neste trabalho, é utilizado um algoritmo que leva em conta a forma específica de elaboração dos dados no processo de construção das curvas típicas de carga de cada grupo de consumidores ligados a um transformador de distribuição.

Admitindo:

$W$ : consumo geral de energia em  $N_m$  dias;

$W_1, W_2, \dots, W_k$ : consumo geral dos consumidores dos grupos 1, 2, ..., k;

$N_u$ : número de dias úteis;  $N_s$ : número de sábados;  $N_d$ : número de domingos para os quais foram definidos os consumos mensais de energia. Logo:

$$N_m = N_u + N_s + N_d.$$

O algoritmo apresentado a seguir para a construção da curva de carga dos transformadores, baseia-se no consumo mensal de energia e permite levar em conta as diferenças existentes no consumo de dias úteis e finais de semana. Para isto, as curvas típicas de carga para dias úteis, sábados e domingos de cada grupo ( $k$ ) de consumidores típicos devem ser normalizadas em relação à carga máxima entre os dias úteis ( $D_{um\acute{a}x}$ ). Pode-se considerar como carga elétrica  $D$ , tanto a corrente ( $I$ ) como a potência ativa ( $P$ ) correspondente. Assim:

$$D_{ukt}^* = \frac{D_{ukt}}{D_{ukm\acute{a}x}}; D_{skt}^* = \frac{D_{skt}}{D_{ukm\acute{a}x}}; D_{dkt}^* = \frac{D_{dkt}}{D_{ukm\acute{a}x}}$$

No passo seguinte, determina-se a demanda média para cada curva de carga normalizada:

$$D_{ukm\acute{e}d}^* = \frac{\sum_{t=1}^n D_{ukt}^*}{n}; D_{sk}^* = \frac{\sum_{t=1}^n D_{skt}^*}{n}; D_{dkm\acute{e}d}^* = \frac{\sum_{t=1}^n D_{dkt}^*}{n}$$

onde:

$n$  = número de ordenadas da curva de carga considerada;

A seguir é determinada a seguinte característica:

$$W_k^* = D_{ukm\acute{e}d}^* \times N_u + D_{skm\acute{e}d}^* \times N_s + D_{dkm\acute{e}d}^* \times N_d$$

A partir daí, define-se o valor da carga máxima para o dia útil de um grupo de  $k$  tipos de consumidores:



restrições. A potência da FC pode ser determinada conforme as considerações apresentadas a seguir.

1) Quantidade de Energia Térmica Necessária: a energia térmica total produzida por uma FC de potência  $P_{FC}$  (kW), operando durante  $nh_{FC}$  horas pode ser calculada a partir de [3]. Segundo [2], parte desta energia é perdida na passagem do ar de resfriamento pelo interior da FC e outra parcela deve-se às perdas de calor que ocorrem entre a superfície da pilha e o ambiente. Assim, a quantidade de calor retirada pela água de resfriamento e que pode ser efetivamente utilizada para fins sanitários pode ser calculada pela Equação 1.

$$Q_{\text{água}} = P_{FC} \left( \frac{1.48}{V_c} - 1 \right) \cdot nh_{FC} - Q_{ar} - Q_{outras} \quad (1)$$

A quantidade de calor removida pelo ar em uma FC com cerca de 45% de eficiência fica em torno de 2% de  $P_{total}$ , e as perdas para o ambiente em torno de 18% de  $P_{total}$  conforme [2].

O uso indiscriminado do chuveiro elétrico no período das 18:00 às 21:00 horas, contribui de forma decisiva para a grande demanda verificada no horário de ponta brasileiro. Mantendo-se uma célula de combustível operando neste período é possível utilizar o calor liberado para o aquecimento de água cujo volume requer uma elevação de temperatura, ou seja, um aumento de energia. Para fins domésticos, essa quantidade de energia relaciona-se aos hábitos particulares de cada um dos ocupantes da residência.

De acordo com [3], energia necessária para aquecer uma quantidade qualquer de água é calculada pela Equação 2.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (kWh) \quad (2)$$

onde  $c$  é o calor específico da água ( $1.163 \times 10^{-3}$  kWh/Kg. $^{\circ}$ C);  $m$  é a quantidade de água, em  $\lambda$ ;  $\Delta t$  é a diferença entre a temperatura final da água e a temperatura inicial.

A partir das Equações 1, 2 e sabendo que  $Q_{ar}$  e  $Q_{outras}$  podem ser calculadas como uma fração de  $P_{total}$ , chega-se à Equação 3 que fornece a potência que uma célula de combustível deve ter para aquecer uma quantidade qualquer de água durante  $nh_{FC}$  horas.

$$P_{FC} = \frac{(m \cdot c \cdot \Delta t + Q_{ar} + Q_{outras}) \cdot V_c}{(1.48 - V_c) \cdot nh_{FC}} \quad (kW) \quad (3)$$

Para uma análise completa desta metodologia, deve-se avaliar melhor os vários tipos de consumidores que poderão se beneficiar efetivamente com o calor gerado pela FC. No caso específico de um condomínio, um projeto adequado aproveitando o calor liberado por coletores solares e pela FC poderá fornecer água para o banho em todos os apartamentos.

Como resultado, a curva de carga será modificada conforme a Figura 2 que representa a eliminação parcial do pico na ponta. Este caso leva em conta o dimensionamento da FC de acordo com a necessidade de

água quente para a instalação. Uma parcela da redução do pico de demanda deve-se à utilização da FC e outra parcela à não utilização dos chuveiros elétricos neste período.

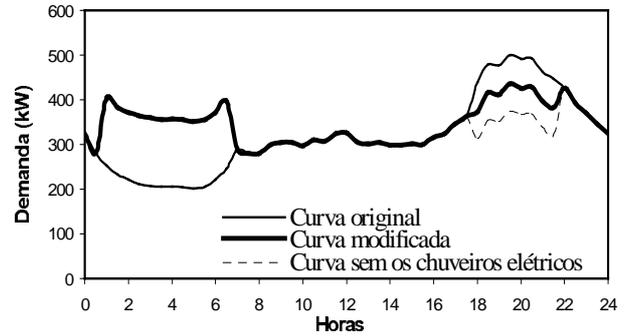


Figura 2 – Redução parcial da demanda na ponta

2) Curva de Carga Uniforme: este outro método permite a escolha da potência da célula de combustível sob a ótica de tornar a curva de carga o mais plana possível. Aqui, o maior interesse do consumidor está ligado à diminuição da demanda própria no horário de ponta (e, como consequência, à diminuição do custo da energia consumida). Para as concessionárias, além da redução na demanda máxima, há a possibilidade de aumentar-se a eficiência das redes de distribuição, por exemplo, por conta da diminuição de perdas de energia.

A uniformidade da curva de carga pode ser estimada através do seguinte coeficiente:

$$k_f = \frac{P_{mq}}{P_{med}}$$

onde  $k_f$  é o coeficiente que representa a forma da curva de carga;  $P_{mq}$  é a média quadrática das potências

instantâneas:  $P_{mq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_t^2}$ ;  $P_{med}$  é a potência média:

$P_{med} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_t$ ;  $n$  é o número de ordenadas

consideradas.

O fator  $k_f$  é sempre maior ou igual a 1. Quando  $k_f = 1$ , a curva de carga apresenta uma forma plana. Para o caso da utilização de células de combustível, tem-se:

$$P_{mq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t - P_{FCt})^2}$$

onde  $P_{FCt}$  é a potência da célula de combustível no instante de tempo  $t$ .

O objetivo, para este caso, é determinar  $P_{FCt}$  para minimizar a função  $z = k_f - 1$ , com o intuito de determinar a potência da célula de combustível que torne a curva de carga o mais plana possível. Da mesma forma, é possível determinar a potência do eletrolisador para a produção de hidrogênio fora da ponta e o número de horas de funcionamento do mesmo a fim de obter um fator  $k_f$  o mais próximo de 1.

Utilizando a densidade do hidrogênio que é 0.084 kg/m<sup>3</sup>(NTP) [4] e, de acordo com [5], a quantidade de H<sub>2</sub>, em Nm<sup>3</sup>, necessária para uma célula de combustível gerar qualquer quantidade de energia é determinada pela Equação 4.

$$H_{2FC} = 0,45 \cdot \frac{P_{FC} \cdot nh_{FC}}{V_c} \quad (\text{Nm}^3) \quad (4)$$

onde P<sub>FC</sub> é a potência nominal da FC; nh<sub>FC</sub> é o número de horas de operação na ponta.

De acordo com [3], para um eletrolisador com eficiência equivalente a η<sub>ele</sub>, a potência necessária para a produção de qualquer quantidade de hidrogênio, incluindo as perdas na geração de energia pela FC e na produção do H<sub>2</sub> por eletrólise é dada pela Equação 5.

$$P_{Et} = \frac{1,0135 \cdot P_{FCt} \cdot nh_{FC} \cdot V_{Ele}}{V_c \cdot \eta_{Ele} \cdot nh_E} \quad (5)$$

onde η<sub>ele</sub> é a eficiência do eletrolisador; P<sub>Et</sub> é a potência do eletrolisador no instante de tempo t; P<sub>FCt</sub> é a potência da FC no mesmo instante t; nh<sub>E</sub> é o número de horas de funcionamento do eletrolisador. Assim, P<sub>mq</sub> passa a ser calculada pela Equação 6.

$$P_{mq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t - P_{FCt} + P_{Et})^2} \quad (6)$$

De um modo geral, diversos regimes de operação podem ser usados nos estágios de armazenamento e geração de energia. O processo de eletrólise pode ocorrer durante as 21 horas fora do horário de ponta ou durante um período de tempo menor, de acordo com as necessidades da concessionária ou consumidor.

### 3.2 Célula de Combustível Operando com Potência Variável

A metodologia anterior estabelece que a FC irá operar com potência constante. O processo de eletrólise pode ocorrer durante as 21 horas fora do horário de ponta ou durante períodos de tempo menores, de acordo com as necessidades da distribuidora de energia ou dos consumidores. Aqui, o objetivo é o mesmo - tornar a curva de carga o mais plana possível. Neste caso, a FC e o eletrolisador irão operar com potência variável. Para tornar a curva de carga praticamente plana, o fator k<sub>f</sub> deve ser minimizado (k<sub>f</sub> → min). Como já foi mencionado, devido às perdas no processo de eletrólise, naturalmente, irá ocorrer um aumento no consumo diário de energia. Contudo, o consumo não deve aumentar de maneira significativa devido à possibilidade de eliminação do chuveiro elétrico através do reaproveitamento da energia térmica liberada.

Um índice para indicar a alteração do consumo pode ser definido como  $w = \frac{w(i)}{w(0)}$ , onde w(0) é o consumo

inicial, e w(i) representa o consumo após a instalação da FC. Neste caso, a alteração no consumo, representada

pelo índice w, deve, da mesma forma, ser minimizada (w → min). Aqui, tem-se um problema típico de otimização bicriterial. Uma vez que ambos os critérios têm praticamente a mesma dimensão, pode-se utilizar uma característica integral aproximada, criada como o produto de dois critérios particulares:  $\psi = k_f \cdot w$ . Desta forma, o problema inicial foi transformado em um problema de um único critério:  $\psi \rightarrow \min$ .

O algoritmo usado inclui os seguintes passos:

- 1) partindo da curva original, calcular k<sub>f</sub>(0), w(0) e ψ(0); que são os fatores da curva original;
  - 2) escolher o incremento Δx da capacidade da FC;
  - 3) o dimensionamento do eletrolisador, Δx<sub>E</sub>, é calculado pela equação (5);
  - 4) Δx é subtraído da maior demanda de potência (P<sub>máx</sub>) e Δx<sub>E</sub> é adicionado a menor demanda (P<sub>mín</sub>);
  - 5) definir, em cada iteração, as novas ordenadas máximas (P<sub>máx</sub>) e mínimas (P<sub>mín</sub>);
  - 6) os novos valores k<sub>f</sub>(i), w(i) e ψ(i) são calculados para a nova curva de carga;
  - 7) se ψ(i) diminuir, voltar para o passo 3; o processo continua até que ψ(i) comece a aumentar;
  - 8) os dados obtidos nesta última iteração vão compor a curva de carga final e podem determinar os parâmetros: a potência da FC, (P<sub>FC</sub>) e do eletrolisador (P<sub>E</sub>):
- $$P_{FC} = \max_t [P_t(0) - P_t(i-1)] ,$$
- $$P_E = \max_t [P_t(i-1) - P_t(0)] , t = 1, \dots, n;$$

## 4. RESULTADOS

Para avaliar a metodologia proposta, foram realizados cálculos para 2 curvas de carga distintas. Em todos os casos, as potências da pilha e do eletrolisador foram calculadas considerando operação com potência constante (P. C.) e variável (P. V.) ao longo de períodos pré-estabelecidos para cada curva. As curvas de carga são apresentadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6 e os parâmetros assim calculados são apresentados na Tabela 1.

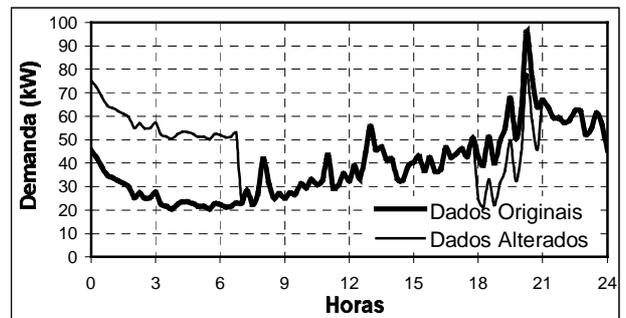


Figura 3 – Curva de Carga 1 – FC com potência constante

Os resultados foram obtidos considerando que as pilhas, com  $V_c = 0,67$  e  $\eta = 45\%$ , operam durante 3 horas. A operação do eletrolisador, com  $\eta = 80\%$  e  $V_{Ele} = 1,85$  V, ocorre durante 7 horas.

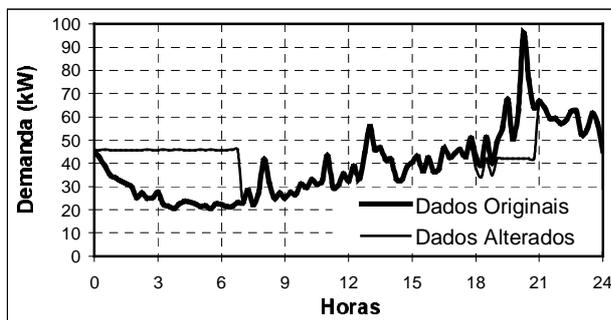


Figura 4 – Curva de Carga 2 – FC com potência variável

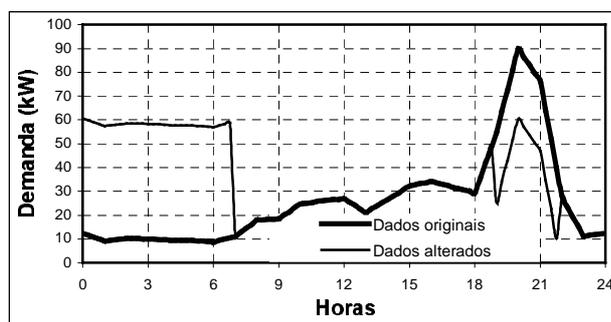


Figura 5 – Curva de Carga 3 – FC com potência constante

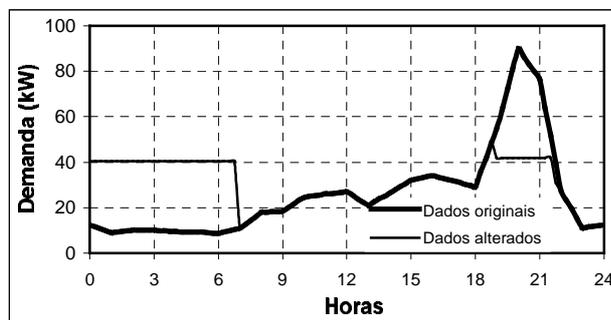


Figura 6 – Curva de Carga 4 – FC com potência variável

Tabela 1. Resultados Experimentais.

	Curva 1		Curva 2	
	P. C.	P. V.	P. C.	P. V.
Consumo original	949,90 kWh/dia		633,28 kWh/dia	
$k_f$ original	1,0670		1,2492	
Parâmetros	P. C.	P. V.	P. C.	P. V.
Cons.diário (kWh)	1104,35	1028,95	883,13	760,42
$P_{FC}$ (kW)	12,75	48,81	20,63	39,10
$P_{Ele}$ (kW)	29,85	25,23	48,28	31,74
$k_f$ (alterado)	1,0397	1,0237	1,1014	1,0591
E. T. Útil (kWh)	29,25	28,32	47,32	46,85
Alteração total no consumo	16,26%	8,32%	39,45%	20,08%

## 5. CONCLUSÃO

A célula de combustível mostra-se como uma perspectiva inovadora para geração de energia no horário de ponta. Porém, novos algoritmos de operação devem ser estabelecidos para que se tenha o máximo proveito desta geração. Os algoritmos apresentados neste trabalho permitem a determinação dos parâmetros de sistemas de geração e armazenamento de energia com base em objetivos definidos pela companhia de energia ou pelo consumidor e de acordo com o tipo de gerenciamento de carga escolhido. Como o sistema proposto é altamente dependente da eficiência da FC e do eletrolisador, é fundamental dispor-se de um rigoroso controle e monitoramento de todo processo para a manutenção do rendimento dentro de níveis aceitáveis.

A localização ótima do sistema dependerá de uma análise multicriterial que deverá levar em conta características tais como a manutenção dos níveis de tensão, redução de perdas, confiabilidade e custos, aliados à experiência de especialistas, para a correta tomada de decisão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são muito gratos a CAPES, ao CNPq e a FAPERGS por seu apoio financeiro. Da mesma forma, um agradecimento especial às empresas AES Sul Distribuidora de Energia e Advanced Machines Co. (AMC) bem como à Universidade Federal de Santa Maria por permitirem o desenvolvimento dos testes práticos em seus laboratórios.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] CORRÊA, J. M.; FARRET, F. A. and CANHA, L. N.; "Evaluation of the Dynamic Characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Generation Systems"; 6º Brazilian Congress on Power Electronics, Vol. 2, Nov/2001, pp. 473-478.
- [2] Laurencelle, F.; Chahine, R.; Hamelin, J.; Agbossou, K.; Furnier, M.; Bose, T. K.; Laperrière, A.; "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack"; Fuel cells 2001, 1, No. 1, pp. 66-71.
- [3] CANHA, L. N.; POPOV, V.; FARRET, F. A., "Determination of the Optimal Parameters of Fuel Cells for Load Curve Management"; V INDUSCON, Jul/2002, paper code 070.
- [4] LARMINIE, J. and DICKS, A., "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley and Sons Publishers, Chichester, England, 2000, 308p.
- [5] SILVA, E. P.; "Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio"; Unicamp Publisher, 1991, 204p.