



**GRUPO II
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO LACTEC CONSIDERANDO GASTOS
COM GÁS E ENERGIA ELÉTRICA**

Jamea Cristina Batista Silva

Heloisa Nunes da Motta

LACTEC

LACTEC

RESUMO

Foi realizado um estudo para determinar o melhor regime de operação de uma célula a combustível baseada em ácido fosfórico, instalada no Laboratório Central do LACTEC, objetivando reduzir gastos com energia elétrica e gás. Foram analisados diversos fatores, tais como: consumo efetivo de gás e energia elétrica, contratos firmados pelo LACTEC relativos a fornecimento de gás e energia elétrica, preços de energia e de gás e ainda efetuadas medições do consumo efetivo de gás pela CaC em diferentes faixas de potência de geração e da curva de carga do LAC. Como resultado, chega-se ao ponto ótimo de operação da CaC, considerando as especificidades técnicas e mercadológicas do local de instalação.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, Células a Combustível, Fontes Alternativas de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em 11 de abril de 2002 entrou em operação uma célula a combustível (CaC) de 200 kW de potência, baseada em ácido fosfórico, instalada junto ao Laboratório Central do LACTEC, localizado no Centro Politécnico da UFPR. A referida CaC foi adquirida no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento: "Estudo da viabilidade técnico-econômica para implantação do sistema de Geração Distribuída a Base de Células a Combustível", executado pelo LACTEC para a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), tendo sido conectada em paralelo com a rede de distribuição de 13,8 kV. A Figura 1 mostra a CaC instalada.

A energia produzida pela unidade é utilizada desde então para atendimento das demandas de energia do LAC (Laboratório Central). No entanto, durante o horário de pico de consumo de energia do Laboratório, a energia produzida pela CaC não é suficiente para suprir 100% da sua demanda, quando então a diferença necessária é suprida pelo sistema da COPEL. Por outro lado, durante os períodos em que a demanda de energia por parte do LAC é inferior à produzida pela CaC, o excedente gerado é injetado no sistema da COPEL.

É importante salientar que este estudo se destina a estabelecer o ponto ótimo de operação da CaC, sabendo-se no entanto de antemão que a sua instalação no LACTEC não tem como objetivo a simples geração de energia. Essa CaC atende a um objetivo maior, servindo como laboratório para vários projetos de P&D, o que obrigatoriamente exige o seu funcionamento em diferentes regimes de operação, ainda que por períodos curtos.

Para estabelecer o melhor regime de operação da CaC instalada, se fez necessário analisar a relação entre os custos da energia gerada e a energia comprada da COPEL. Para isso, foram analisados o consumo de energia do LAC e de gás pela CaC, bem como os contratos de fornecimento de gás natural e de energia elétrica, e os preços praticados pelos fornecedores. Os próximos itens apresentam em detalhe todo o trabalho realizado.



FIGURA 1 – Célula a combustível instalada no LACTEC

2.0 - FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Análise do contrato de fornecimento de energia elétrica

O LACTEC firmou contrato de fornecimento de energia elétrica em 23/02/2002, com vigência até 22/02/2005, com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), segundo a estrutura tarifária horo-sazonal na modalidade tarifa verde, subgrupo A4. Esta estrutura apresenta tarifas altas para o MWh faturado durante o horário de ponta do sistema (das 18:00 às 21 horas durante horário normal e das 19:00 às 22 horas durante o horário de verão). Para este patamar da curva de carga, segundo dados disponíveis no site da COPEL [1], durante o período seco o preço do MWh faturado é de R\$ 808,76 e durante o período úmido é de R\$ 791,50, sendo que o período seco se estende de dezembro a maio e o período úmido é composto pelos demais meses. Para os horários 'fora-de-ponta' do sistema, o valor do MWh cai significativamente para R\$ 104,48 e R\$ 92,87 para os períodos seco e úmido, respectivamente. No entanto, vale estabelecer a relação do preço da energia durante o horário de ponta e 'fora de ponta' do sistema, que situa-se da ordem de 1 para 7,74 para o período seco e de 1 para 8,52 durante o período úmido. Esta estrutura tarifária é a mais indicada para o perfil de carga do LAC, uma vez que o seu pico de consumo não coincide com o horário de ponta do sistema. Na Figura 2 são apresentados valores médios de consumo, resultantes de medições realizadas da curva de carga do LAC.

2.2 Análise das faturas de eletricidade do LAC

Na Figura 3 são apresentados dados de consumo de energia proveniente do sistema da COPEL pelo LAC, ou seja, a parcela da energia necessária para alimentação de suas cargas que não foi suprida pela CaC. Os dados apresentados são relativos a um período de 12 meses (outubro de 2003 a setembro de 2004).

Assim, verifica-se uma oscilação nos dados de consumo de energia proveniente da COPEL, a qual se deve à variação do fornecimento de energia por parte da CaC. Nos meses em que a CaC fornece uma quantidade significativa de energia, importa-se menos energia do sistema da COPEL e vice-versa. Durante os meses de dezembro e janeiro, o consumo também é reduzido devido às férias coletivas adotadas pela Instituição.

3.0 - FORNECIMENTO DE GÁS

3.1 Análise do contrato de fornecimento de gás

Para operação da CaC, o LACTEC firmou contrato de fornecimento de gás com a COMPAGÁS (Companhia Paranaense de Gás) em abril de 2002. O contrato tem duração de 5 anos, além de um período inicial de testes (3 meses).

Curva Diária de Carga Característica do LAC para um dia Útil

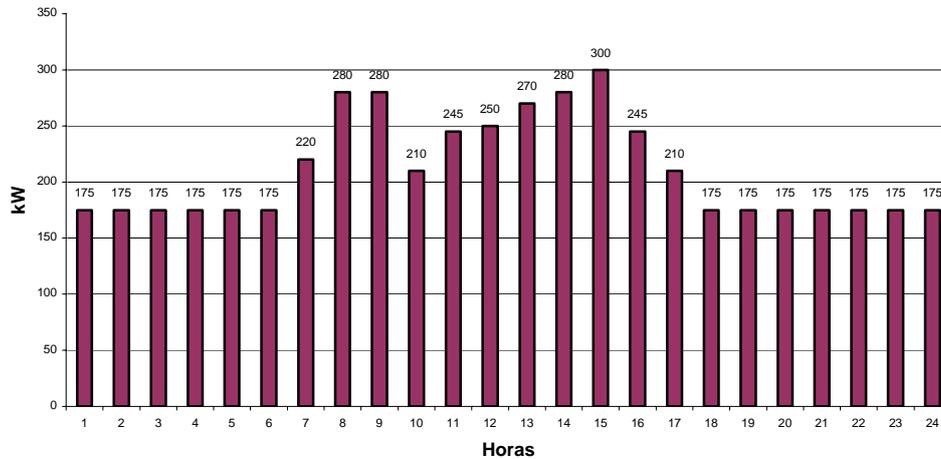


FIGURA 2 - Curva de carga do LAC durante um dia em que a CaC não contribuiu com energia gerada

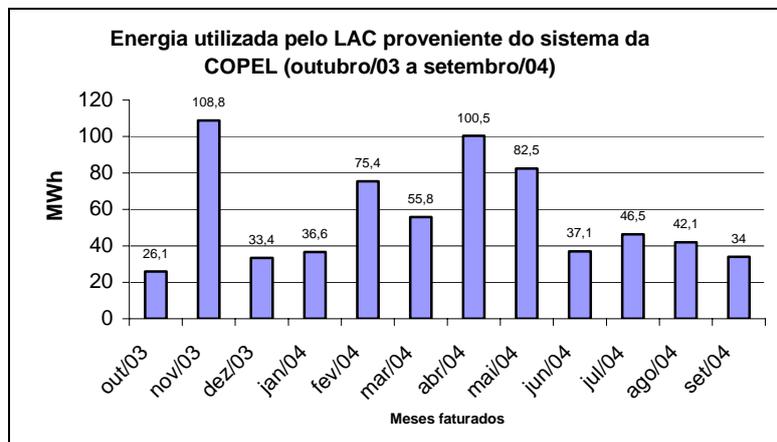


FIGURA 3 – Energia importada do sistema da COPEL pelo LAC de outubro/03 a setembro/04

Esse contrato possui cláusula relativa à quantidade mínima de consumo, sendo que, sempre que o consumo mínimo anual for menor que 80% da soma da Quantidade Mensal Contratada (QMC), o LACTEC terá de pagar a diferença, em uma única parcela no final de cada ano contratado. O consumo mínimo mensal contratado é proporcional à quantidade de dias no mês, conforme Tabela 1.

TABELA 1 - Quantidade Mensal Contratada de gás (QMC)

Quantidade de dias no mês	QMC (m ³ /mês)	QMC x 0,8 (m ³ /mês)
31 dias	21.700	17.360
30 dias	21.000	16.800
28 dias	19.600	15.680

Quando somadas estas quantidades mensais contratadas para um período de 12 meses, multiplicadas pelo fator 0,8, obtém-se uma quantidade mínima anual igual a 204.400 m³/ano. Esta quantidade de gás deve ser paga pelo LACTEC mesmo que não seja totalmente utilizada.

3.2 Análise das faturas de gás do LAC

Pela análise de todas as faturas de consumo de gás do LAC, foram calculados os valores médios (apresentados na Tabela 2), para meses com 28, 30 e 31 dias, respectivamente. Para todos os meses analisados, verificou-se que houve um consumo superior à quantidade mínima regida em contrato, ou seja, o LACTEC utilizou todo o gás efetivamente faturado.

TABELA 2 - Consumo de gás do LAC

Média Mensal	Consumo (m ³ /mês) *
Média para meses com 28 dias	16.535,95
Média para meses com 30 dias	19.157,43
Média para meses com 31 dias	19.694,28

* - Valor médio calculado pela análise das faturas de gás efetivamente consumido pelo LAC.

4.0 – MEDIÇÕES DO CONSUMO DE GÁS REALIZADAS NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL (CaC)

Objetivando estabelecer a quantidade de gás necessária para a geração de 1 kWh pela CaC, foram realizadas medições de consumo com a célula operando em diferentes faixas de potência: idle, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200 kW, durante um período mínimo de 24 horas em cada faixa. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Quantidade de gás necessária para a geração do kWh pela CaC

Potência fixada [kW]	Energia útil gerada [kWh/mês]	m ³ /kWh
idle	0	
10	7.440	1,926
25	18.600	0,940
50	37.200	0,522
75	55.800	0,348
100	74.400	0,265
125	93.000	0,272
150	111.600	0,273
175	130.200	0,280
200	148.800	0,283

Quando a CaC encontra-se no regime idle, não ocorre geração de energia útil, somente geração de energia para consumo interno pela célula. Esse consumo interno compreende manutenção da mesma aquecida e de seus equipamentos em funcionamento. Caso haja uma parada total da CaC, os gastos com nitrogênio para realização de uma nova partida são muito altos. Assim, não convém realizar paradas totais por períodos curtos, sendo preferível deixá-la aquecida, em regime idle.

Pela análise dos resultados das medições, verifica-se que o consumo de gás por kWh gerado cai conforme aumenta a potência fixada. No entanto, a partir da faixa de 100 kW, o consumo começa a subir lentamente até atingir um valor de 0,28 m³/kWh gerado. A princípio espera-se que uma unidade de geração apresente melhor rendimento operando próximo à sua potência nominal, fato não totalmente observado nos resultados destas medições. Posteriormente deverão ser realizados estudos objetivando identificar o fator responsável por este, ainda que muito pequeno, aumento no consumo de gás por kWh gerado a partir da faixa de 100 kW.

A Figura 4 permite melhor visualizar a quantidade de gás necessária, para um período de 31 dias, com a CaC operando em diferentes faixas de potência durante 24 horas diárias. A linha rosada corresponde à quantidade mínima mensal de consumo regida pelo contrato de fornecimento de gás (17.360 m³/mês).

5.0 - PREÇOS PRATICADOS PELA COMPAGÁS

Para estabelecer a melhor faixa de potência de operação da célula, mais um fator deve ser considerado: as faixas de preços praticados pela COMPAGÁS. De acordo com dados disponíveis no site da empresa [2], a COMPAGÁS pratica preços diferenciados para consumidores industriais, de acordo com o consumo mensal do cliente, conforme Tabela 4. Quanto maior o consumo, menor é o valor cobrado por m³ de gás. Considerando este fato, calculou-se os custos com gás decorrentes da operação da CaC em diferentes faixas de potência, considerando que a mesma opere durante 31 dias em cada faixa. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.

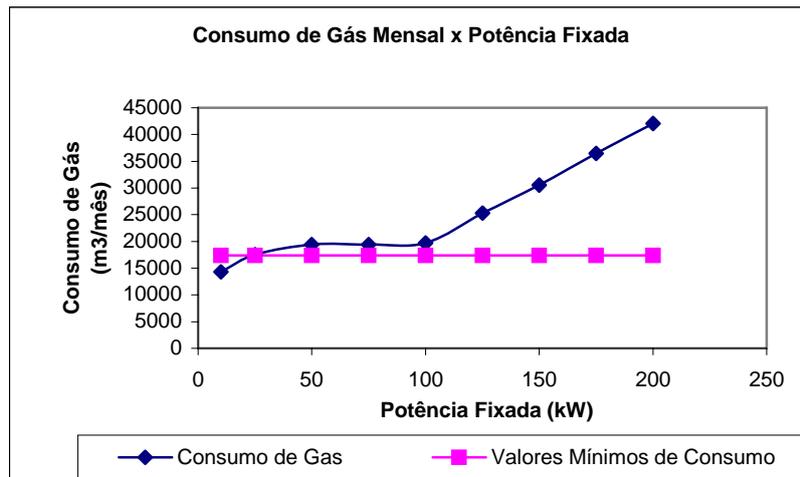


FIGURA 4 - Consumo de gás para diferentes faixas de potência

TABELA 4. Preços do gás fornecido pela COMPAGÁS para clientes industriais

Volume [m ³ /dia]		Preço do gás [R\$/m ³]
de	até	--
0	500	1,1531
501	1000	0,9689
1001	2000	0,8305
2001	4000	0,8077
4001	8000	0,8032
8001	16000	0,8018
16001	32000	0,8005
32001	64000	0,7987
64001	9999999	0,7986

6.0 – DESPESA COM GÁS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

A partir dos dados apresentados, pôde-se avaliar o custo do gás por kWh gerado pela CaC em diferentes faixas de potência. Esses valores são apresentados na Figura 5.

TABELA 5. Custos com gás necessário para que a CaC opere em diferentes faixas de potência por um período de 31 dias

Potência Fixada [kW]	Custo do Gás/mês [R\$]
idle	15.184,94
10	16.525,42
25	16.946,25
50	18.817,49
75	18.804,48
100	19.108,84
125	24.476,25
150	29.567,34
175	30.302,45
200	34.954,67

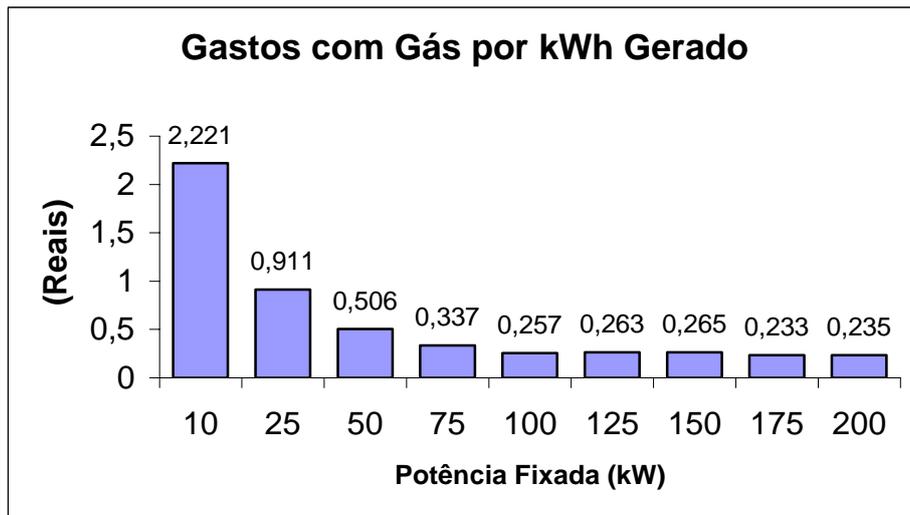


FIGURA 5 - Gastos com gás por kWh gerado pela CaC para diferentes faixas de potência

Pela análise da Figura 5, observa-se que, para as faixas de potência fixadas, as que apresentam melhor custo-benefício quando considerados em conjunto o consumo de gás da CaC por kWh e as tarifas praticadas pela COMPAGÁS são as faixas 175 e 200 kW. No entanto, apesar destes resultados, é importante lembrar que o custo da energia proveniente da COPEL para o período 'fora de ponta' do sistema é inferior aos custos do gás, inclusive para as faixas que apresentam melhor custo-benefício técnico-econômico. Assim, este dado deverá ser considerado na modelagem que será apresentada no item 7.0, permitindo que a CaC opere em diferentes faixas de potência, considerando a grande diferença de preços praticada pela COPEL para os períodos de 'ponta' e 'fora de ponta' do sistema.

7.0 MODELAGEM DO PROBLEMA

7.1 Dados relevantes levantados

Quando todas as informações anteriormente apresentadas são analisadas em conjunto, verifica-se que:

- Durante o horário de ponta do sistema da COPEL a energia elétrica é extremamente cara, custando aproximadamente 8 vezes o valor cobrado para os demais horários;
- O pico de consumo de energia elétrica do LAC não coincide com o horário de ponta do sistema da COPEL;
- Durante o pico do sistema da COPEL a demanda do LAC pode ser suprida integralmente pela CaC;
- O LACTEC firmou contrato de aquisição de gás no qual é estipulado um consumo mínimo obrigatório;
- A CaC instalada junto ao LAC não tem capacidade de geração suficiente para atender 100% de sua demanda em todos os horários para os dias úteis;
- O melhor custo benefício de geração de energia pela CaC com relação a gastos com gás, encontra-se nas faixas de potência de 175 e 200 kW, quando analisados em conjunto o consumo de gás por kWh gerado e as faixas de tarifas adotadas pela COMPAGÁS;
- o custo da energia proveniente da COPEL para o período 'fora de ponta' do sistema é inferior aos custos decorrentes da compra de gás para geração, inclusive para as faixas de geração que apresentam melhor custo-benefício técnico-econômico.

7.2 Função objetivo da modelagem

A função objetivo deve ser formulada de tal maneira a minimizar a somatória dos custos decorrentes da aquisição de gás (proveniente da COMPAGÁS) e energia elétrica (comprada da COPEL) e ao mesmo tempo assegurar o atendimento às cargas do LAC de forma ininterrupta e com qualidade. Nas equações (1), (2) e (3) apresenta-se a formulação matemática.

$$f_{obj} = \min(C_G + C_C) \quad (1)$$

Sendo:

$$C_C = C_{FP} \left\{ \Delta_{DU} \left(\sum_{t=1}^{18} E_{FP,t} + \sum_{t=22}^{24} E_{FP,t} \right) + \Delta_{FS} \sum_{t=1}^{24} E_{FS,t} \right\} + \Delta_P C_P \sum_{t=19}^{21} E_{P,t} \quad (2)$$

$$C_G = \Delta_{DU} \left\{ \sum_{k=1}^9 \sum_{t=1}^{18} (\delta_{FP,k} C_{GFP,k} E_{GFP,t}) + \sum_{k=1}^9 \sum_{t=22}^{24} (\delta_{FP,k} C_{GFP,k} E_{GFP,t}) \right\} + \quad (3)$$

$$+ \Delta_{DU} \sum_{k=1}^9 \sum_{t=19}^{21} (\delta_{P,k} C_{GP,k} E_{GP,t}) + \Delta_{FS} \sum_{k=1}^9 \sum_{t=1}^{24} (\delta_{FS,k} C_{GFS,k} E_{GFS,t})$$

Onde:

C_G – custo mensal do gás utilizado para a geração da energia;

C_C – Custo mensal da energia comprada do sistema da COPEL;

C_P – Custo do kWh comprado no período de ‘ponta’ do sistema da COPEL;

C_{FP} – Custo do kWh comprado no período ‘fora de ponta’ do sistema da COPEL, inclusive nos fins de semana e feriados;

$E_{P,t}$ - Energia comprada no período de ‘ponta’ do sistema da COPEL, durante o patamar t da curva de carga do LACTEC;

$E_{FP,t}$ – Energia comprada no período ‘fora de ponta’ do sistema da COPEL, durante o patamar t da curva de carga do LACTEC;

$E_{FS,t}$ – Energia comprada durante os fins de semana proveniente do sistema da COPEL, durante o patamar t da curva de carga do LAC;

$C_{GFP,k}$ – Custo do gás necessário para geração de 1 kWh de energia durante o período ‘fora de ponta’ do sistema da COPEL, com a CaC operando na faixa de potência k;

$C_{GP,k}$ – Custo do gás necessário para geração de 1 kWh de energia durante o período de ‘ponta’ do sistema da COPEL, com a CaC operando na faixa de potência k;

$C_{GFS,k}$ – Custo do gás necessário para geração de 1 kWh de energia durante os fins de semana e feriados, com a CaC operando na faixa de potência k;

$E_{GFP,t}$ – Energia gerada pela CaC no período ‘fora de ponta’ do sistema da COPEL, durante o patamar t da curva de carga do LAC;

$E_{GP,t}$ – Energia gerada pela CaC no período de ‘ponta’ do sistema da COPEL, durante o patamar t da curva de carga do LAC;

$E_{GFS,t}$ – Energia gerada pela CaC durante os fins de semana e feriados, durante o patamar t da curva de carga do LAC;

$\delta_{FP,k}$ - Variável inteira de decisão de operação da CaC na faixa de potência k durante o período ‘fora de ponta’ do sistema da COPEL;

$\delta_{P,k}$ - Variável inteira de decisão de operação da CaC na faixa de potência k durante o período de ‘ponta’ do sistema da COPEL;

$\delta_{FS,k}$ - Variável inteira de decisão de operação da CaC na faixa de potência k durante os fins de semana e feriados;

Δ_{DU} - quantidade de dias úteis no mês considerado;

Δ_{FS} - quantidade de dias de fim de semana e feriados no mês considerado.

É importante esclarecer que o índice k apresentado em (3) varia de acordo com a potência de geração da CaC, sendo que para k = 1, significa que a CaC opera gerando 10 kW de potência; para k = 2, a CaC opera gerando 25 kW; ... para k = 9, a CaC opera gerando 200 kW.

O objetivo do trabalho consiste em minimizar os custos decorrentes da compra de gás e energia elétrica, mas também se faz necessário assegurar o atendimento ininterrupto e com qualidade às cargas do LAC. Para tanto, algumas restrições se fazem necessárias ao modelo, as quais são expressas nas equações (4), (5) e (6).

$$E_t = E_{G,t} + E_{C,t} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^9 \delta_{FP,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^9 \delta_{P,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^9 \delta_{FS,k} = 1 \quad (5)$$

$$C_G \geq 16.820 \quad (**) \quad (6)$$

Sendo:

E_{t-} - Energia necessária para o suprimento das cargas do LAC durante o período t da curva de carga;

$E_{G,t}$ - Energia gerada pela CaC durante o período t da curva de carga do LAC;

$E_{C,t}$ - Energia comprada do Sistema da COPEL durante o período t da curva de carga do LAC.

(**) Este valor corresponde à quantidade mensal de gás contratada (17.360 m³) multiplicada pelo valor do m³ de gás (0,9689 Reais).

7.3 Simulação realizada

Foi realizada simulação, onde foi implementado o modelo acima descrito utilizando o programa LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer). Para a realização da simulação foram adotados os seguintes dados de entrada:

- 1) um mês de 31 dias, sendo 22 dias úteis e 9 dias de fim de semana e feriados;
- 2) que o horário de ponta da COPEL tem duração de 3 horas diárias para os dias úteis;
- 3) que o horário fora de ponta da COPEL tem duração de 21 horas diárias para os dias úteis e 24 horas para os demais dias;
- 4) utilizou-se a premissa, baseada nos valores da tabela 4 e no consumo efetivo de gás, de que o LAC se enquadra no grupo de consumidores da COMPAGÁS que utilizam entre 501 e 1000 m³/dia, pagando portanto um valor de 0,9689 Reais/m³;
- 5) estabeleu-se que o número de regimes de operação da CaC seria limitado a 3, para evitar uma grande quantidade de manobras, sendo:
 - regime A: corresponde a faixa de operação da CaC no período 'fora de ponta' do sistema da COPEL para dias úteis;
 - regime B: corresponde a faixa de operação da CaC no período de 'ponta' do sistema da COPEL;
 - regime C: corresponde a faixa de operação da CaC no período 'fora de ponta' do sistema da COPEL para fins de semana e feriados;
- 6) considerando que os custos decorrentes da compra de gás são superiores aos custos decorrentes da compra de energia, mesmo para as faixas de geração que apresentam melhor rendimento, resolveu-se limitar o consumo mensal de gás do LAC ao valor mínimo regido em contrato, conforme apresentado na Tabela 1, que para um mês de 31 dias corresponde ao valor de 17.360 m³/mês. Por outro lado, deverá utilizar o máximo possível do montante de gás contratado, para evitar desperdícios.

Resultados obtidos

Aplicando a função objetivo apresentada nas equações (1), (2) e (3), as restrições apresentadas em (4), (5) e (6), e os dados de entrada acima descritos, chegou-se ao seguinte regime de operação: que a CaC deverá ser operada na faixa de potência de 200 kW durante o horário de 'ponta' do sistema da COPEL e em 10 kW no horário de 'fora de ponta' do sistema da COPEL e durante os fins de semana e feriados.

8.0 - CONCLUSÕES

Considerando a restrição relativa à máxima utilização do gás contratado, chegou-se à solução em que a CaC deve ser operada em potência máxima (200 kW) durante o horário de pico do sistema da COPEL. Esta solução possibilita gerar o máximo possível de energia durante o período em que a energia é cara no sistema da COPEL. Por outro lado, a operação da CaC somente durante este período não consome integralmente a quantidade mínima de gás contratada. Este fato facilita a otimização da operação da célula, considerando que não é conveniente realizar partidas frequentes na mesma devido aos altos custos do nitrogênio utilizado neste procedimento. Assim, durante o período 'fora de ponta' do sistema da COPEL, bem como nos fins de semana e feriados, a quantidade mínima de gás contratada ainda permite que a CaC opere na faixa de potência de 10 kW. Não convém operá-la em faixas superiores de potência de geração durante os horários fora de ponta do sistema e fins de semana e feriados, uma vez que os custos decorrentes da compra de gás suplementar da COMPAGÁS superam os custos com a compra de energia da COPEL.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Extraído de: [http://www.copel.com/sitearquivos.nsf/arquivos/res-146-04_aneel/\\$FILE/res-146-04_aneel.pdf](http://www.copel.com/sitearquivos.nsf/arquivos/res-146-04_aneel/$FILE/res-146-04_aneel.pdf).
- (2) Extraído de: <http://www.compagas.com.br/port/tabelaprecosindustrial.asp>.