

4

Resultados experimentais

4.1

Célula

Ao ser inicializada, a célula realiza várias operações, antes da energia elétrica ser gerada. Primeiramente, procedimentos de limpeza do gás dentro do reformador são realizados através dos assopradores. Como a célula está conectada em rede, é fornecida energia elétrica para o processo de start up.

A potência da célula de combustível foi selecionada em 2,5 kW. Cerca de 1,3 kW são fornecidos para o ar condicionado e para o computador que está conectado com a célula. O restante da energia é fornecido para o circuito elétrico da PUC-Rio.

Os testes foram realizados entre os dias 06 de novembro de 2004 e 05 de janeiro de 2006 para uma potência de 2,5 kW.

As Tab. 7, 8, 9 e 10 mostram o poder calorífico do gás durante os testes. Estes dados foram medidos pela CEG do Rio de Janeiro.

4.1.1

Poder Calorífico

Durante o período compreendido entre novembro de 2004 e janeiro de 2006, foram realizados e medidos testes para uma potência de 2,5 kW para o regime permanente. Os cálculos foram baseados no poder calorífico inferior (PCI) do gás medido pela CEG do Rio de Janeiro.

Na Tab. 7 estão as medidas para o PCS e PCI do gás obtidos em novembro de 2004.

Tabela 7: PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em novembro de 2004.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
6/11/2004	39.982	36.127
7/11/2004	39.771	35.931
8/11/2004	39.865	36.019
9/11/2004	39.872	35.978
10/11/2004	39.821	36.020
12/11/2004	39.868	36.020
13/11/2004	39.828	35.985
14/11/2004	39.787	35.945
16/11/2004	39.928	36.078
17/11/2004	40.013	36.158
27/11/2004	39.493	35.672
Média	39.839	35.994
Desvio	137	128
Variação (%)	0,34	0,36

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG variaram pouco no mês de novembro de 2004, cerca de 0,34% e 0,36%, respectivamente.

Em dezembro de 2004, foram obtidos os seguintes PCS e PCI do gás relacionados na Tab. 8.

Tabela 8: PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2004.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
23/12/2004	39.283	35.475
24/12/2004	39.474	35.654
25/12/2004	39.597	35.769
26/12/2004	39.618	35.788
Média	39.493	35.672
Desvio	154	144
Variação (%)	0,39	0,40

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG variaram pouco no mês de dezembro de 2004, cerca de 0,39% e 0,40%, respectivamente.

Para dezembro de 2005, o PCS e o PCI do gás medidos estão relacionados na Tab. 9 a seguir.

Tabela 9 – PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em dezembro de 2005.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
15/12/2005	38.214	34.470
19/12/2005	38.807	35.024
20/12/2005	38.665	34.891
21/12/2005	40.028	36.164
22/12/2005	38.879	35.091
23/12/2005	38.678	34.903
26/12/2005	38.306	34.556
27/12/2005	38.267	34.520
28/12/2005	38.221	34.476
29/12/2005	38.255	34.508
30/12/2005	38.315	34.565
Média	38.603	34.833
Desvio	535	499
Variação (%)	1,39	1,43

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG no mês de dezembro de 2005 variaram mais que no mês de dezembro de 2004, cerca de 1,39% e 1,43%, respectivamente.

Em janeiro de 2006, o PCS e o PCI do gás medidos estão relacionados na Tab. 10 a seguir.

Tabela 10 – PCS e PCI do gás, à 20°C e 1 atm, obtidos em janeiro de 2006.

Dia	PCS (kJ/Nm³)	PCI (kJ/Nm³)
2/1/2006	38.630	34.859
3/1/2006	40.573	36.673
4/1/2006	39.120	35.317
5/1/2006	38.581	34.813
Média	39.226	35.416
Desvio	930	869
Variação (%)	2,37	2,45

Pode-se observar que o PCS e o PCI informados pela CEG no mês de janeiro de 2006 variaram, cerca de 2,37% e 2,45%, respectivamente.

No geral foram medidos PCS e PCI de 39258 kJ/Nm³ e 35448 kJ/Nm³, respectivamente, com valores inferiores aos medidos pelo estudo realizado pela PUC-Rio anteriormente de 39679 kJ/Nm³ e 35843 kJ/Nm³, respectivamente [30].

4.1.2

Eficiência térmica global da célula

Para cada teste, os valores médios de todas as medições, como vazão volumétrica e potência de saída, foram armazenados. A pilha e a unidade de controle do reformador (SARC) enviam informações sobre uma variedade de sensores que estão dentro da célula.

A eficiência térmica global medida na célula (η_G) se baseia no PCI do gás e pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica de saída e a energia que entra do gás natural, Eq. 30. A eficiência térmica global ($\eta_{G,SARC}$) é calculada pelo SARC. A vazão de gás é expressa em litro normal por minuto (slm), nas condições padrões de 20°C e 1 atm.

A Tab. 11 mostra os resultados para novembro de 2004, utilizando o PCI do gás dado na Tab. 07. Também pode ser visto que a pilha e o controlador do reformador calculam sistematicamente um valor mais alto para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente por causa de um PCI fixo do gás que é suposto nos cálculos mais baixo que o medido. A energia gerada pelo gerador (pilha) atende prioritariamente a uma carga especificada pelo usuário chamada de carga prioritária. A diferença em relação ao que é gerado é introduzida na rede interna da PUC-Rio.

Tabela 11 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em novembro de 2004.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G,SARC}$
6/11/2004	2,55	18,91	22,5	22,34
7/11/2004	2,55	18,99	22,4	22,48
8/11/2004	2,41	18,54	21,7	21,61
9/11/2004	2,47	18,76	22,0	21,98
10/11/2004	2,47	19,15	21,6	21,51
12/11/2004	2,49	19,62	21,2	21,03
13/11/2004	2,50	19,77	21,1	21,11
14/11/2004	2,48	19,90	20,9	20,99
16/11/2004	2,47	20,51	20,1	20,09
17/11/2004	2,48	21,37	19,3	19,13
27/11/2004	2,47	20,36	20,5	20,57
Média	2,49	19,63	21,21	21,17
Desvio	0,04	0,87	0,98	0,99
Variação (%)	1,57	4,42	4,62	4,68

A eficiência global variou 4,62% no mês de novembro de 2004 devido às variações nas vazões de gás de 4,42%.

Pode-se observar que a η_G ficou bem perto da $\eta_{G, SARC}$ significando uma boa confiabilidade dos dados.

Para dezembro de 2004, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 8, é mostrada na Tab. 12 a seguir.

Tabela 12 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2004.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
23/12/2004	2,55	19,39	22,3	23,30
24/12/2004	2,55	19,28	22,3	22,26
25/12/2004	2,54	19,34	22,1	23,24
26/12/2004	2,53	19,33	22,0	23,10
Média	2,54	19,34	22,2	22,98
Desvio	0,01	0,05	0,15	0,48
Variação (%)	0,38	0,23	0,68	2,11

A eficiência global variou 0,68% no mês de dezembro de 2004 devido às variações nas potências de saída AC de 0,38%.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 3% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido.

Para dezembro de 2005, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 9, é mostrada na Tab. 13 a seguir.

Tabela 13 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em dezembro de 2005.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
15/12/2005	2,54	18,75	23,7	25,69
19/12/2005	2,50	18,09	23,7	26,18
20/12/2005	2,50	18,27	23,4	26,02
21/12/2005	2,67	20,03	22,5	24,60
22/12/2005	2,49	17,90	23,8	26,14
23/12/2005	2,53	18,14	23,5	26,02
26/12/2005	2,50	18,60	23,4	26,01
27/12/2005	2,51	19,20	22,0	25,85
28/12/2005	2,48	19,08	22,5	26,49
29/12/2005	2,50	19,38	22,5	25,77
30/12/2005	2,55	19,35	22,2	25,71
Média	2,52	18,80	23,0	25,86
Desvio	0,05	0,67	0,68	0,48
Variação (%)	2,09	3,55	2,94	1,85

A eficiência global variou 2,94% no mês de dezembro de 2005 devido às variações nas vazões de gás de 3,55%.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 11% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido. A eficiência aumentou 4% em relação a dezembro de 2004 devido à troca da pilha.

Para janeiro de 2006, a eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás da Tab. 10, é mostrada na Tab. 14 a seguir.

Tabela 14 – Eficiência térmica global da célula (η_G) para 2,5 kW em janeiro de 2006.

Dia	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$
2/1/2006	2,50	19,76	21,8	25,51
3/1/2006	2,48	19,71	20,7	25,42
4/1/2006	2,48	20,44	20,7	25,24
5/1/2006	2,48	21,00	20,5	25,33
Média	2,49	20,23	20,93	25,38
Desvio	0,01	0,61	0,59	0,12
Variação (%)	0,40	3,03	2,82	0,46

A eficiência global variou 2,82% no mês de janeiro de 2006 devido às variações nas vazões de gás de 3,03% e nas variações de 0,40% de eletricidade gerada.

Pode-se observar que a unidade de controle do reformador (SARC) calcula um valor maior em cerca de 18% do que o medido para a eficiência térmica global da célula. Provavelmente, por causa do valor fixo do PCI do gás empregado nos cálculos, um pouco abaixo do medido.

No geral foram medidas potências AC de 2,5 kW, 19,36 slm de vazão de gás, 22,0% de η_G e 23,36% de $\eta_{G, SARC}$. No estudo realizado pela PUC-Rio anteriormente foi encontrado uma η_G de 25,9% devido à uma vazão menor de gás de 16,3 slm.

A Fig. 20 ilustra a variação no tempo da eficiência elétrica da célula de combustível utilizada no experimento.

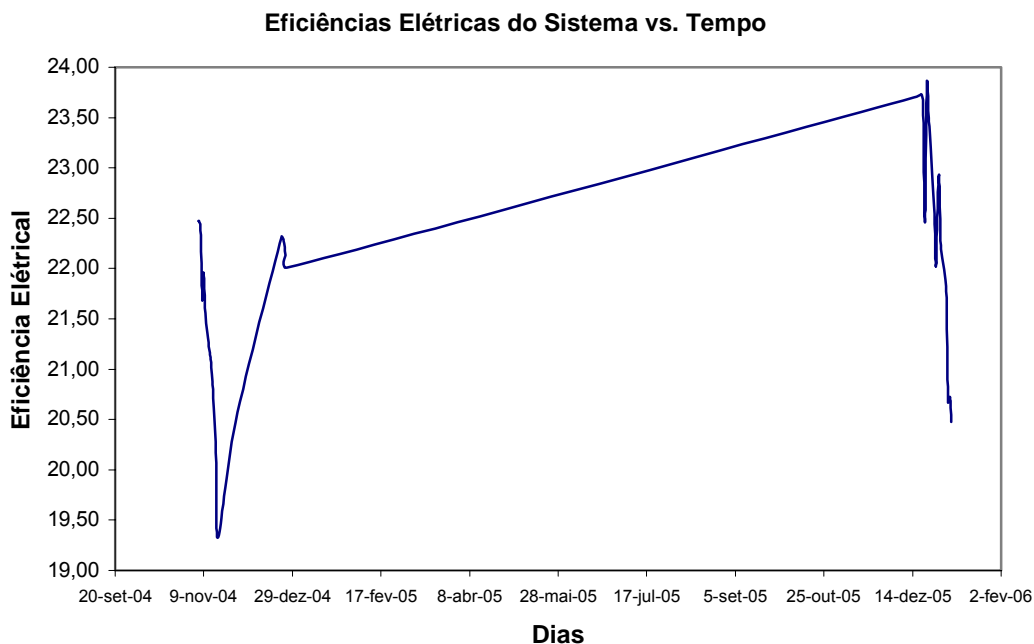


Figura 20: Gráfico da eficiência elétrica da célula no tempo.

Com isso, pode-se verificar que a eficiência global da célula variou de 19,3% a 23,8% sendo consideravelmente menor que a eficiência global nominal de uma célula PEM (40% a 50%) [25]. Contudo, deve-se ter cuidado em comparar as eficiências medidas aqui baseadas no PCI do gás natural que produz corrente AC e as calculadas com base no PCS do gás. Outra observação importante é que na prática, as contribuições do reformador para converter o gás natural em hidrogênio e do inversor para converter a corrente DC em corrente AC reduzem significativamente a eficiência elétrica da célula. Em outros estudos [26-29], por exemplo, foram relatadas eficiências globais entre 20% e 30%. Com isso, o uso da energia elétrica gerada pela célula seria insuficiente para justificar um investimento inicial. Conseqüentemente, a viabilidade econômica da célula em aplicações residenciais sempre dependerá da fração útil do calor gerado pela célula considerando a carga térmica necessária para o ambiente (água quente e aquecimento).

Pode-se verificar que de acordo com o Anexo II, a eficiência da célula ficou maior ao se considerar a carga térmica.

4.1.3

Eficiência térmica

A eficiência térmica da pilha (η_T) está relacionada com a entrada de hidrogênio [21], ou seja, pode ser calculada pela razão entre tensão de saída da célula (V_{exit}) e a energia do hidrogênio que entra conforme Eq. 24.

Os resultados de novembro de 2004 são mostrados na Tab. 15.

Tabela 15 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em novembro de 2004.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
6/11/2004	0,70	47,4
7/11/2004	0,70	47,3
8/11/2004	0,70	47,3
9/11/2004	0,69	46,4
10/11/2004	0,68	45,6
12/11/2004	0,66	44,5
13/11/2004	0,66	44,5
14/11/2004	0,66	44,3
16/11/2004	0,63	42,6
17/11/2004	0,62	41,6
27/11/2004	0,65	43,9
Média	0,67	45,0
Desvio	0,03	1,95
Variação (%)	4,22	4,34

A eficiência térmica em relação ao H₂ variou 4,34% devido à variação de 4,22% na tensão gerada no mês de novembro de 2004.

Para dezembro de 2004, os resultados são mostrados na Tab. 16.

Tabela 16 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2004.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
23/12/2004	0,68	45,9
24/12/2004	0,68	45,7
25/12/2004	0,68	45,8
26/12/2004	0,67	45,4
Média	0,68	45,7
Desvio	0,01	0,22
Variação (%)	0,74	0,47

A eficiência térmica em relação ao H₂ variou 0,47% devido à variação de 0,74% na tensão gerada no mês de dezembro de 2004.

Para dezembro de 2005, os resultados para são mostrados na Tab. 17.

Tabela 17 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em dezembro de 2005.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
15/12/2005	0,72	48,6
19/12/2005	0,73	49,3
20/12/2005	0,73	49,2
21/12/2005	0,73	49,1
22/12/2005	0,73	49,3
23/12/2005	0,73	49,2
26/12/2005	0,72	48,9
27/12/2005	0,72	48,8
28/12/2005	0,72	48,7
29/12/2005	0,73	49,1
30/12/2005	0,72	48,9
Média	0,73	49,0
Desvio	0,01	0,24
Variação (%)	0,72	0,50

A eficiência térmica em relação ao H_2 variou 0,50% devido à variação de 0,72% na tensão gerada no mês de dezembro de 2005.

Pode-se comprovar que, após a substituição de algumas peças da célula que estavam causando uma diminuição na eficiência térmica devido à degradação no mês de dezembro de 2004, houve um aumento na eficiência térmica no mês de dezembro de 2005.

Para janeiro de 2006, os resultados são mostrados na Tab. 18.

Tabela 18 - Eficiência térmica da pilha (η_T) em janeiro de 2006.

Dia	V_{exit} (V)	η_T (%)
2/1/2006	0,72	48,6
3/1/2006	0,72	48,4
4/1/2006	0,72	48,3
5/1/2006	0,72	48,5
Média	0,72	48,5
Desvio	0,00	0,13
Variação (%)	0,00	0,27

A eficiência térmica em relação ao H_2 variou 0,27% no mês de Janeiro de 2006.

No geral foi medida uma tensão gerada de 0,7 V e com isso calculada uma eficiência térmica de 47,0%. No estudo realizado na PUC-Rio anteriormente foi calculada uma eficiência térmica de 49,3% devido à um tensão gerada de 0,73 V.

Pode-se comprovar que após um mês de funcionamento a célula já apresentou uma diminuição na eficiência térmica devido à degradação. Após substituição da pilha a taxa de degradação foi reduzida significativamente.

4.1.4

Eficiência de conversão

A eficiência de conversão (η_{CE}) pode ser calculada utilizando as potências AC e DC medidas.

Os resultados para novembro de 2004 são mostrados na Tab. 19.

Tabela 19 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em novembro de 2004.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
6/11/2004	2,55	3,32	77,1
7/11/2004	2,55	3,30	77,3
8/11/2004	2,41	3,14	76,9
9/11/2004	2,47	3,21	77,1
10/11/2004	2,47	3,21	77,1
12/11/2004	2,49	3,23	77,2
13/11/2004	2,50	3,23	77,4
14/11/2004	2,48	3,21	77,4
16/11/2004	2,47	2,21	77,2
17/11/2004	2,48	3,21	77,4
27/11/2004	2,47	3,22	77,0
Média	2,49	3,14	77,2
Desvio	0,04	0,31	0,17
Variação (%)	1,57	9,91	0,22

A eficiência de conversão variou 0,22% devido à uma variação de 9,91% da potência DC no mês de novembro de 2004.

Os resultados para dezembro de 2004 são mostrados na Tab. 20.

Tabela 20 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2004.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
23/12/2004	2,55	3,29	77,6
24/12/2004	2,55	3,28	77,7
25/12/2004	2,54	3,29	77,7
26/12/2004	2,53	3,27	77,6
Média	2,54	3,28	77,7
Desvio	0,01	0,01	0,06
Variação (%)	0,38	0,29	0,07

A eficiência de conversão variou 0,07% devido à uma variação de 0,36% da potência AC no mês de dezembro de 2004.

Para dezembro de 2005, os resultados são mostrados na Tab. 21.

Tabela 21 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em dezembro de 2005.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
15/12/2005	2,55	3,34	76,5
19/12/2005	2,51	3,28	76,3
20/12/2005	2,49	3,28	76,4
21/12/2005	2,68	2,67	75,7
22/12/2005	2,49	3,30	75,7
23/12/2005	2,54	3,31	76,6
26/12/2005	2,51	3,30	76,1
27/12/2005	2,52	3,36	74,9
28/12/2005	2,46	3,28	75,1
29/12/2005	2,51	3,37	74,6
30/12/2005	2,56	3,36	76,0
Média	2,53	3,26	75,8
Desvio	0,06	0,20	0,7
Variação (%)	2,28	6,09	0,9

A eficiência de conversão variou 0,9% devido à uma variação de 6,09% da potência DC no mês de dezembro de 2005.

Para janeiro de 2006, os resultados são mostrados na Tab. 22.

Tabela 22 - Eficiência de conversão (η_{CE}) em janeiro de 2006.

Dia	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
2/1/2006	2,50	3,31	75,7
3/1/2006	2,49	3,32	75,1
4/1/2006	2,49	3,35	74,4
5/1/2006	2,49	3,34	74,6
Média	2,49	3,33	75,0
Desvio	0,01	0,02	0,58
Variação (%)	0,20	0,55	0,77

A eficiência de conversão variou 0,77% devido à uma variação de 0,55% da potência DC no mês de janeiro de 2006.

No geral foram medidas potência AC e DC de 2,51 kW e 3,23 kW, respectivamente, e uma eficiência de conversão de 75,0%. No estudo realizado na PUC-Rio anteriormente obteve-se uma eficiência de conversão de 80,0%.

Pode ser observado que a eficiência de conversão DC/AC diminuiu devido à degradação do inversor, que não foi substituído.

A eficiência do inversor de corrente está muito abaixo das normalmente encontradas no mercado. Valores superiores a 90% [19] são factíveis para este tipo de equipamento.

Se considerássemos uma eficiência de inversão de 90%, a eficiência da pilha com reformador passaria de 22% para 25,6% - base PCI – um aumento de mais de 16%, mas ainda muito baixa para torná-la competitiva com um motor de combustão a gás.

4.1.5

Eficiência do reformador

Finalmente, a eficiência do reformador (η_R) pode ser calculada pela Eq. 28, utilizando a razão entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia química do gás natural, consumido no reformador.

Os resultados para novembro de 2004 estão na Tab. 23.

Tabela 23 - Eficiência do Reformador (η_R) em novembro de 2004.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
6/11/2004	1,34	67,6
7/11/2004	1,34	67,6
8/11/2004	1,51	74,0
9/11/2004	1,34	67,5
10/11/2004	1,34	67,6
12/11/2004	1,34	67,9
13/11/2004	1,34	67,4
14/11/2004	1,34	67,1
16/11/2004	1,34	67,3
17/11/2004	1,37	67,8
27/11/2004	1,37	68,1
Média	1,36	68,2
Desvio	0,05	1,95
Varição (%)	3,74	2,86

A eficiência do reformador variou 2,86% devido à uma variação de 3,74% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

Para dezembro de 2004, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 24 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2004.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
23/12/2004	1,24	63,9
24/12/2004	1,24	64,0
25/12/2004	1,24	63,5
26/12/2004	1,24	63,8
Média	1,24	63,8
Desvio	0,00	0,22
Varição (%)	0,00	0,34

A eficiência do reformador variou 0,34% devido à uma variação de 0,40% do PCI do gás.

Para dezembro de 2005, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 25 - Eficiência do Reformador (η_R) em dezembro de 2005.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
15/12/2005	1,24	65,0
19/12/2005	1,24	64,3
20/12/2005	1,27	64,9
21/12/2005	1,39	69,4
22/12/2005	1,24	65,1
23/12/2005	1,24	63,5
26/12/2005	1,24	64,1
27/12/2005	1,24	61,5
28/12/2005	1,32	67,0
29/12/2005	1,24	62,8
30/12/2005	1,24	60,9
Média	1,26	64,4
Desvio	0,05	2,39
Varição (%)	3,85	3,71

A eficiência do reformador variou 3,71% devido à uma variação de 3,85% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

Pode-se observar que mesmo trocando os catalisadores do reformador houve uma degradação porque não foi instalado o redutor de enxofre (importante para o gás brasileiro que possui uma concentração de 70 mg/m³ de enxofre de acordo com a norma da ANP n° 104).

Para janeiro de 2006, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 26 - Eficiência do Reformador (η_R) em janeiro de 2006.

Dia	$m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$	η_R (%)
2/1/2006	1,27	61,9
3/1/2006	1,24	58,1
4/1/2006	1,24	58,9
5/1/2006	1,26	58,9
Média	1,25	59,4
Desvio	0,02	1,68
Varição (%)	1,20	2,82

A eficiência do reformador variou 2,82% devido à uma variação de 1,20% de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

No geral foi calculada uma eficiência de reforma de 50,9%, inferior à encontrada na literatura (75% a 90%), devido à uma média de 1,29 de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$. No estudo realizado anteriormente na PUC-Rio foi calculada uma eficiência de reforma de 64,5% e uma média de 1,2 de $m_{H_2, R} / m_{H_2, u}$.

4.1.6

Potencial de cogeração

Na Tab. 27 estão relacionadas as seguintes eficiências:

Tabela 27 – Potencial de cogeração medido nesse estudo.

	Unidade	Valores Obtidos
η_T	%	47,0
E_{gas}	kW	11,5
η_G	%	22,0
η_{pilha}	%	32,4
η_{aux}	%	6,8
η_{ref}	%	38,9
η_{cog}	%	71,3

No estudo anterior [30] foram obtidas as seguintes eficiências:

Tabela 28 – Potencial de cogeração medido em março de 2003.

	Unidade	Valores Obtidos
η_T	%	49,3
E_{gas}	kW	9,74
η_G	%	25,9
η_{pilha}	%	33,8
η_{aux}	%	6,6
η_{ref}	%	33,7
η_{cog}	%	67,5

Pode-se observar que as eficiências η_T e η_G diminuíram devido à degradação. A eficiência da pilha diminuiu devido a um aumento da energia química do gás. Conseqüentemente, a energia química do gás rejeitada pelo reformador em forma de calor foi maior devido à uma baixa eficiência global e da pilha. Com a carga térmica o aproveitamento da energia química do gás aumentou bastante, ficando em 70%.

Neste estudo, foram encontrados os seguintes resultados:

Tabela 29: Informações gerais

Eficiência Global (kW_e/PCI)	22%
Aproveitamento ($(kW_e+kW_{th})/PCI$)	69%
Uso do combustível (PCI kJ/hr)	40515

4.1.7

Degradação da célula de combustível (2,5 kW)

Tabela 30 – Comparação de desempenho ao longo do tempo.

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Nov/04	Dez/04	Dif.
Eficiência térmica teórica (do H ₂)	%	η_{TH}	82,3	82,3	0,0
Eficiência térmica (do H ₂)	%	η_T	45,0	45,7	0,7
Energia do gás (PCI)	kW	E_{gas}	11,8	11,5	-0,3
Energia do H ₂ gerado (PCI)	kW	$E_{H_2,gen}$	9,8	8,9	-0,8
Eficiência do reformador	%	η_R	68,2	63,8	-4,4
Eficiência de conversão	%	η_{CE}	77,2	77,7	0,5
Eficiência térmica (do gás)	%	η_G	21,2	22,2	1,0
Energia H ₂ (PCS), utilizada	kW	E_{H_2}	7,2	7,2	0,0
Calor rejeitado da célula	kW	Q_{rej}	4,0	3,9	0,0
Calor rejeitado (% gás)	%	η_{pilha}	33,5	33,9	0,5
Energia perdida auxiliar (% gás)	%	η_{aux}	6,3	6,4	0,1
Energia rej. do reform. (% gás)	%	η_{ref}	39,1	37,5	-1,6
Energia para cogeração (% gás)	%	η_{cog}	72,5	71,4	-1,1
Tensão da célula	V	V_{exit}	0,7	0,7	0,0
Consumo específico	Nm ³ /kWh	CE	0,5	0,5	0,0

Com diferenças justificadas pela incerteza de medição, uma análise da Tab. 30 mostra que a eficiência térmica entre nov/04 e dez/04, tanto a partir do hidrogênio como do gás natural, permaneceu constante; o mesmo aconteceu para o calor rejeitado pela célula, bem como para a energia disponível para cogeração, a tensão na célula, a energia rejeitada do reformador como calor e o consumo específico de combustível. Com isso, foi mostrado que não houve uma degradação da célula entre esses dois meses.

Pode-se também ser observado que a eficiência de conversão DC/AC permaneceu constante.

Tabela 31 – Comparação de desempenho ao longo do tempo.

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Dez/05	Jan/06	Dif.
Eficiência térmica teórica (do H2)	%	η_{TH}	82,3	82,3	0,0
Eficiência térmica (do H2)	%	η_T	49,0	48,5	-0,5
Energia do gás (PCI)	kW	E _{gas}	11,0	11,9	0,9
Energia do H2 gerado (PCI)	kW	E _{H2,gen}	8,6	8,6	0,0
Eficiência do reformador	%	η_R	64,4	59,4	-5,0
Eficiência de conversão	%	η_{CE}	75,8	74,9	-0,9
Eficiência térmica (do gás)	%	η_G	23,0	20,9	-2,1
Energia H2 (PCS), utilizada	kW	E _{H2}	6,8	6,9	0,1
Calor rejeitado da célula	kW	Q _{rej}	3,5	3,5	0,0
Calor rejeitado (% gás)	%	η_{stack}	31,6	29,7	-1,9
Energia perdida auxiliar (% gás)	%	η_{aux}	7,3	7,0	-0,4
Energia rej. do reform. (% gás)	%	η_{ref}	38,0	42,4	4,4
Energia para cogeração (% gás)	%	η_{cog}	69,6	72,1	2,5
Tensão da célula	V	V _{exit}	0,7	0,7	-0,1
Consumo específico	Nm ³ /kWh	CE	0,4	0,5	0,0

Uma análise da Tab. 31 mostra que a eficiência térmica, tanto a partir do hidrogênio como do gás natural, diminuiu. Ao mesmo tempo, a energia disponível para cogeração aumentou. A energia rejeitada pelo reformador em forma de calor aumentou. Com isso, foi mostrado que houve uma degradação da célula entre esses dois meses, devida normalmente, à presença de CO no sistema.

Pode-se também ser observado que a eficiência de conversão DC/AC diminuiu.

4.1.8

Resultado de incerteza de medição

Tabela 32 – Resultado de incerteza de medição

Data	U_{η_T} (%)	U_{EH2} (kW)	U_{Qrej} (kW)	$U_{\eta_{Reformador}}$ (%)	U_{η_G} (%)	U_{Egas}	$U_{\eta_{pilha}}$ (%)	$U_{\eta_{aux}}$ (%)	$U_{\eta_{ref}}$ (%)	$U_{\eta_{cog}}$ (%)	Q (kW)
6/11/2004	0,80	0,14	0,12	1,64	0,87	0,39	1,23	0,51	1,61	0,49	
7/11/2004	0,37	0,14	0,09	1,72	0,95	0,40	0,97	0,76	1,67	0,54	
8/11/2004	0,82	0,17	0,14	1,82	0,96	0,38	1,33	0,79	1,81	0,45	
9/11/2004	0,73	0,15	0,12	1,51	0,86	0,37	1,16	0,64	1,53	0,36	
10/11/2004	1,10	0,21	0,18	2,06	1,00	0,47	1,85	0,70	2,47	0,77	
12/11/2004	0,57	0,13	0,10	1,61	0,85	0,41	1,07	0,55	1,50	0,47	
13/11/2004	0,43	0,10	0,08	1,59	0,82	0,41	0,89	0,48	1,32	0,46	
14/11/2004	0,74	0,14	0,13	1,73	0,83	0,42	1,23	0,48	1,59	0,48	
16/11/2004	1,21	0,25	0,22	1,94	0,84	0,41	1,94	0,70	2,25	0,38	
17/11/2004	1,22				0,93			0,71	2,64	0,68	
27/11/2004	1,13	0,23	0,20	2,04	0,88	0,48	1,89	0,59	2,43	0,68	
23/12/2004	0,47	0,09	0,08	1,43	0,82	0,37	0,82	0,46	1,13	0,36	
24/12/2004	0,67	0,12	0,11	1,59	0,86	0,40	1,13	0,44	1,49	0,50	
25/12/2004	0,64	0,11	0,10	1,56	0,84	0,39	1,05	0,44	1,37	0,45	
26/12/2004	0,62	0,12	0,10	1,62	0,87	0,41	1,11	0,48	1,53	0,52	
15/12/2005	0,53	0,11	0,08	1,54	0,92	0,37	0,95	0,56	1,43	0,51	1,64
19/12/2005	0,46	0,11	0,08	1,80	1,01	0,42	1,09	0,76	1,91	0,78	2,29
20/12/2005	1,23	0,20	0,18	1,87	0,98	0,37	1,78	0,77	2,23	0,56	1,92
21/12/2005	0,72	0,16	0,12	1,90	0,89	0,43	1,21	0,66	1,86	0,61	
22/12/2005	0,40	0,15	0,09	1,62	0,87	0,32	0,86	0,83	1,43		1,13
23/12/2005	0,54	0,09	0,08	1,65	0,94	0,39	0,99	0,50	1,55	0,63	
26/12/2005	0,75	0,20	0,13	1,79	0,83	0,34	1,24	0,88	1,77		1,14
27/12/2005	0,67	0,12	0,10	1,99	0,88	0,39	1,04	0,56	1,47	0,49	6,62
28/12/2005	0,76	0,11	0,11	1,72	0,85	0,38	1,10	0,41	1,40	0,49	7,71
29/12/2005	0,72	0,13	0,11	1,94	0,93	0,39	1,13	0,60	1,57	0,53	0,98
30/12/2005	0,47	0,07	0,07	1,36	0,71	0,36	0,64		0,76	0,22	
2/1/2006	0,67	0,13	0,10	1,63	0,84	0,39	1,04	0,54	1,45	0,47	0,47
3/1/2006	0,47	0,13	0,09	1,81	0,86	0,42	0,90	0,68	1,47	0,48	2,39
4/1/2006	0,48	0,14	0,09	2,21			1,26	0,91	2,24	0,93	1,32
5/1/2006	0,70	0,13	0,11	1,91	0,84	0,44	1,07	0,51	1,53	0,55	1,08
Média	0,70	0,14	0,11	1,74	0,88	0,40	1,17	0,62	1,68	0,53	2,39
Desv	0,25	0,04	0,04	0,20	0,06	0,03	0,32	0,14	0,42	0,14	2,31

Uma análise da Tab. 32 mostra que as incertezas ocorreram devido ao fato de a vazão de hidrogênio ser estimada pela célula e não calculada. Outro ponto relevante é a variação do PCI que não foi considerada e sim calculada uma média.

A vazão de água na cogeração não foi variada constantemente, ou seja, com um delta permanente, gerando uma certa imprecisão nos dados. Outro ponto é a baixa temperatura de entrada do propileno glicol no trocador de calor da cogeração (HX3).

4.1.9

Comparação com outros estudos [31]

Tabela 33 – Comparação com outros estudos

	AC Output Power (kW)	Vazão de gás (SLM)	η_G (%)	$\eta_{G, SARC}$ (%)
PUC-Rio	2,5	18,91	22,5	22,3
Cherry Point Naval air Base	2,0	11,1	12,4	12,1
CERL	2,4	6,5	24,3	26,1

Tabela 34 – Comparação com outros estudos

	AC Power (kW)	DC Power (kW)	η_{CE} (%)
PUC-Rio	2,5	3,2	76,4
Cherry Point Naval air Base	2,0	2,7	73,3
CERL	2,4	3,3	72,7

Tabela 35 – Comparação com outros estudos

	$E_{H_2, gen}$ (kW)	Recuperação de Calor (kW)	Vazão de água (m ³ /s)	Varição de temperatura (%)	η_{cog} (%)
PUC-Rio	9	5,5	0,00046	2,9	45,5
Cherry Point Naval air Base	16,7	0,9	0,00015	1,4	19,4
CERL	9,9	1,1	0,00021	1,6	38,6

Pode-se observar que a eficiência elétrica η_G variou em função da vazão do gás e da tensão de saída AC, ficando bem próximo da eficiência $\eta_{G, SARC}$. As eficiências de conversão ficaram bem próximas, mostrando a confiabilidade dos dados. A recuperação de calor foi maior na célula da PUC-Rio devido à uma maior vazão de água e a um ΔT maior.