

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SUBSTITUIÇÃO DE AQUECEDORES ELÉTRICOS POR QUEIMADORES POROSOS RADIANTES

¹Catapan, R. C., ²Pereira, F. M., ³Oliveira, A. M.

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica

¹catapan@cet.ufsc.br

²fernando@cet.ufsc.br

³amirol@emc.ufsc.br

Resumo – O presente trabalho avalia as vantagens da substituição de aquecedores radiantes elétricos por queimadores porosos radiantes. As avaliações se baseiam nas características operacionais dos queimadores porosos, levantadas experimentalmente em laboratório e em dados da literatura sobre os aquecedores elétricos. Os custos de operação dos dois equipamentos são comparados para as mesmas potências radiantes levando-se em conta as suas respectivas eficiências de radiação. Os preços da energia elétrica e do gás natural foram obtidos das tabelas de preço concessionárias do estado de Santa Catarina. O queimador poroso radiante apresentou custos de operação mais baixos em toda a faixa de potência avaliada.

Palavras-Chave: queimadores porosos radiantes; aquecedores elétricos; eficiência de radiação

Abstract – This work analyses the applicability of the radiant porous burners in substitution of electric heaters. The analysis is based on experimental studies of the radiant burner.

Keywords: radiant porous burner, industrial use, efficiency

1. Introdução

A taxa de transferência de calor em aquecedores infravermelhos é determinada pela temperatura da fonte quente e pelas características de absorção dos produtos sendo aquecidos. A grande vantagem do aquecimento radiante sobre o convectivo é a sua maior eficiência, pois a transferência de calor independe do contato direto dos gases com a superfície a ser aquecida através de uma camada limite, proporcionando um aquecimento mais rápido.

O aquecimento radiante é largamente utilizado em processos industriais, sendo que os equipamentos mais encontrados nestas aplicações são os aquecedores radiantes elétricos. Este trabalho procura avaliar as vantagens da substituição dos equipamentos elétricos convencionais por queimadores porosos radiantes.

2. Análise Técnico-Econômica

A avaliação técnico-econômica da substituição de aquecedores elétricos por queimadores radiantes a gás natural foi realizada tendo como base a eficiência de radiação destes equipamentos. A eficiência de radiação é dada pela razão entre a energia emitida por radiação térmica e a energia total consumida pelo equipamento. A equação 1 define a eficiência de radiação e a equação 2 mostra que a energia radiante é diretamente influenciada pela temperatura da fonte quente elevada à quarta potência. A equação 3 é fornece a energia total liberada pela combustão.

$$\eta_{\text{rad}} = \frac{Q_{\text{rad}}}{S_r} \quad (1)$$

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon_q A_q \sigma_{\text{SB}} T_{\text{sup}}^4 \quad (2)$$

$$S_r = m_{\text{gn}} \text{PCI}_{\text{gn}} \quad (3)$$

onde η_{rad} é a eficiência de radiação, S_r é a energia total gerada pela combustão, Q_{rad} é a energia de radiação emitida pelo queimados a partir da sua superfície, ε_q é a emissividade do queimador, A_q é a área superficial, σ_{SB} é a constante de Stefan Boltzmann, T_{sup} é a temperatura superficial do queimador, m_{gn} é o fluxo de massa de gás natural e PCI_{gn} é o calor de reação do combustível.

A eficiência de radiação dos queimadores porosos foi levantada experimentalmente neste projeto. A metodologia experimental consta nos relatórios de caracterização dos protótipos. Os resultados experimentais de um queimador podem ser expressos através de um diagrama de operação como o mostrado na figura 1.

Este diagrama apresenta a faixa de operação do queimador, a potência total gerada, a temperatura superficial e a eficiência de radiação como função da relação de equivalência (Φ - que define a proporção da mistura ar/combustível) e da velocidade de chama (u_{ch} - que define o fluxo total de gases para uma dada área de queimador). O diagrama permite que o operador ajuste o ponto de operação do queimador de forma a obter a melhor condição possível para a sua aplicação.

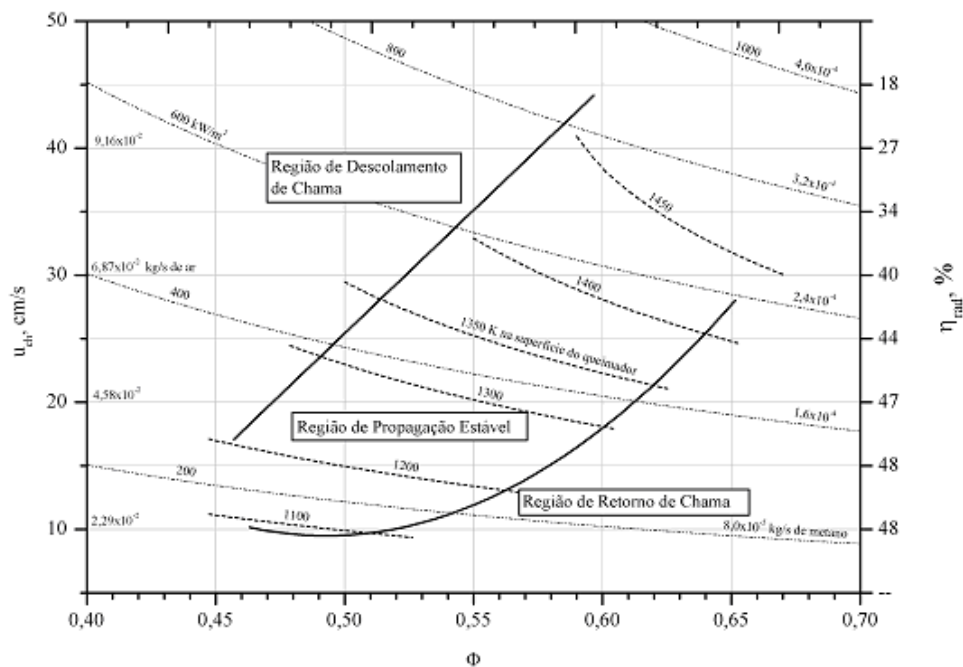


Figura 1 - Diagrama de operação do queimador de alta temperatura.

Nota-se que a eficiência de radiação diminui com o aumento da velocidade de chama, numa faixa que varia aproximadamente entre 50% e 30%. Assim, Como estamos interessados em altas taxas de transferência de calor por radiação, os melhores pontos de operação serão os de Φ elevado e u_{ch} baixo. Desta forma, estaremos operando em potências elevadas mantendo uma eficiência de radiação também elevada.

Os resultados experimentais dos queimadores de alta e baixa temperatura mostraram que a eficiência de radiação não apresenta forte dependência com a relação de equivalência. Assim, esta eficiência pode ser expressa como função apenas da velocidade de chama através de um polinômio. Por simplicidade, na presente análise é usada uma função linear relacionando η_{rad} e u_{ch} .

Informações sobre a eficiência de radiação de aquecedores elétricos são muito escassas. Apesar da eficiência de conversão de energia elétrica em energia térmica radiante por efeito Joule em resistores ser bastante elevada, esta geração de radiação não é direcional, fazendo com que o aquecedor tenha que dispor de um sistema de redirecionamento da radiação. Este sistema implica em perdas de calor que diminuem a eficiência de radiação do equipamento.

Petterson e Stenström (2000), estudaram a eficiência um aquecedor radiante elétrico para secagem de papel. O equipamento avaliado consistia de um aquecedor de 15 x 40 cm com 12 lâmpadas de tungstênio de 2 kW cada. Posicionado atrás das lâmpadas encontra-se um refletor plano com revestimento de ouro na superfície do aquecedor um vidro protetor de quartz. Os componentes elétricos do equipamento são resfriados convectivamente por um pequeno ventilador.

A medição da radiação emitida pelo aquecedor foi feita de duas formas. Primeiro através de um calorímetro a água de 1 x 1,5 m de área posicionado a apenas 2 cm de distância do aquecedor, de forma a captar toda a energia radiante emitida. O segundo método foi através de um sensor de fluxo de radiação (radiômetro 2 π - Land Instruments Ltd.) com precisão de 3%. A integração da intensidade de radiação medida pelo radiômetro sobre toda a área do aquecedor fornece a energia térmica radiante emitida pelo aquecedor. Os testes foram realizados na faixa de 4 a 20 kW de potência total. Os dois métodos de medição apresentaram boa concordância. A curva de eficiência obtida para aquecedor radiante elétrico em função da potência de operação é mostrado na figura 2. Nota-se que a eficiência de radiação cresce com o aumento da potência. Uma reta ajustada aos pontos experimentais será usada na análise.

A análise que será mostrada a seguir compara os custos de operação do aquecedor radiante elétrico com o queimador poroso radiante desenvolvido. Para tanto, considera-se um queimador poroso com as mesmas dimensões do aquecedor elétrico proposto (15 x 40 cm). Esta extrapolação é possível porque existirá pouca variação no comportamento do queimador com o aumento da área de radiação.

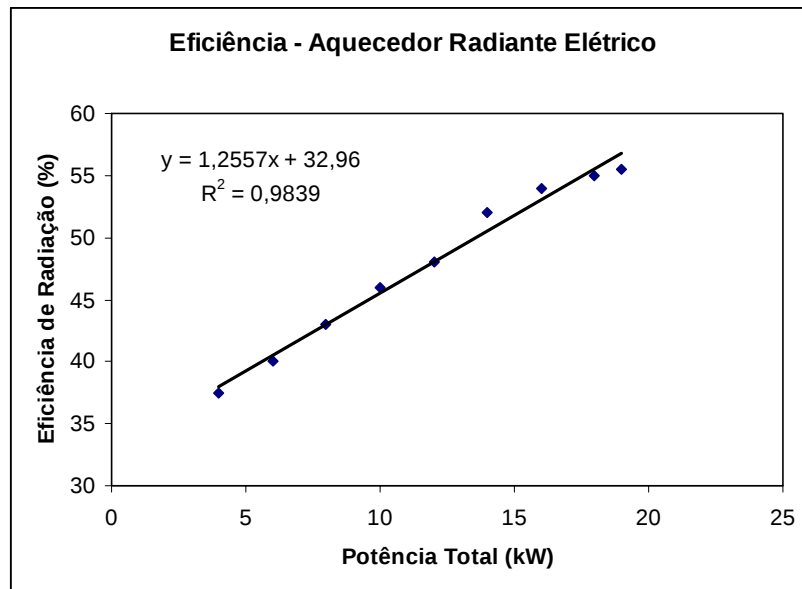


Figura 2 - Eficiência do aquecedor radiante elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000) em função da potência de operação

Os preços da energia elétrica e do gás natural foram tirados das tabelas de tarifas para o mercado comercial disponibilizados pela CELESC e pela SCGÁS em suas páginas www.celelesc.com.br e www.scgas.com.br. O preço do gás natural considerado foi de 1,4939 R\$/Nm³, o que corresponde a cerca de 0,1639 R\$/kWh. O preço da energia elétrica considerada foi de 0,41611 R\$/kWh – grupo B3, sem diferença de preço para as horas de pico e sem custo de demanda. Os demais dados do gás natural foram aproximados dos dados do gás metano puro, o que resulta em uma aproximação conservadora, já que o PCI do gás natural é superior ao do metano.

A tabela 1 mostra os resultados obtidos da análise comparativa entre o aquecedor elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000) e o queimador poroso radiante para altas temperaturas desenvolvido neste projeto. O queimador poroso é operado com relação de equivalência de 0,55 e velocidades de chama correspondentes à sua faixa de estabilidade. A potência radiante variou de 6,5 a 13,5 kW e a potência total do queimador de 13 a 38 kW. Para a mesma faixa de potência radiante o aquecedor elétrico apresentou potência total de 13 a 22 kW, extrapolando um pouco a capacidade máxima deste equipamento que é de 20 kW.

A figura 3 mostra a variação do preço da energia radiante (PER), dada em R\$/kWh, para os dois aquecedores em função da radiação emitida. O preço da energia radiante é sempre inferior para o queimador poroso. Para 7 kW de potência radiante, o aquecedor a gás apresentou um preço de 0,30 R\$/kWh, enquanto que o aquecedor elétrico cerca de 0,82 R\$/kWh (170% superior). Na potência de 1 kW radiante, o aquecedor a gás apresenta um preço de 0,40 R\$/kWh, enquanto que o aquecedor elétrico cerca de 0,70 R\$/kWh (75% superior).

Nota-se que os preços da energia radiante para ambos aquecedores devem sempre ser maiores que os preços base da energia elétrica e do gás natural usados, já que o PER leva em consideração a eficiência de radiação.

As diferenças entre os preços da energia radiante para os dois aquecedores se refletem em diferenças nos custos de operação de cada equipamento. A figura 4 mostra uma comparação do custo total por hora de operação (CTH) para os dois aquecedores em estudo.

Tabela 1 – Comparação entre o aquecedor radiante elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000) e o queimador poroso radiante para altas temperaturas operando com $\Phi = 0,55$ e u_{ch} variando de 12 a 35 cm/s. Onde: Φ - relação de equivalência, u_{ch} - velocidade de chama, S_{rad} - potência radiante, η_{rad} - eficiência de radiação, PER - preço da energia radiante, CTH - custo total por hora de operação e S_{total} - potência consumida.

Φ	u_{ch} cm/s	S_{rad} kW	$\eta_{rad,g}$ %	$\eta_{rad,e}$ %	PER _g R\$/kWh	PER _e R\$/kWh	CTH _g R\$	CTH _e R\$	$S_{total,g}$ kW	$S_{total,e}$ kW
0,55	12	6,494	49,6	49,45	0,3028	0,8415	1,966	5,464	13,09	13,13
0,55	13,21	7,042	48,86	50,48	0,3073	0,8243	2,164	5,805	14,41	13,95
0,55	14,42	7,571	48,12	51,44	0,3121	0,8089	2,363	6,124	15,73	14,72
0,55	15,63	8,08	47,38	52,34	0,3169	0,795	2,561	6,423	17,05	15,44
0,55	16,84	8,57	46,64	53,19	0,322	0,7823	2,759	6,704	18,38	16,11
0,55	18,05	9,04	45,9	53,99	0,3272	0,7708	2,958	6,968	19,7	16,75
0,55	19,26	9,491	45,16	54,73	0,3325	0,7602	3,156	7,215	21,02	17,34
0,55	20,47	9,922	44,42	55,43	0,3381	0,7506	3,354	7,448	22,34	17,9
0,55	21,68	10,33	43,68	56,09	0,3438	0,7418	3,553	7,666	23,66	18,42
0,55	22,89	10,73	42,94	56,71	0,3497	0,7338	3,751	7,87	24,98	18,91
0,55	24,11	11,1	42,2	57,29	0,3559	0,7264	3,949	8,061	26,3	19,37
0,55	25,32	11,45	41,46	57,82	0,3622	0,7196	4,148	8,24	27,62	19,8
0,55	26,53	11,78	40,72	58,33	0,3688	0,7134	4,346	8,406	28,94	20,2
0,55	27,74	12,1	39,98	58,8	0,3756	0,7077	4,544	8,561	30,26	20,57
0,55	28,95	12,39	39,23	59,23	0,3827	0,7025	4,743	8,705	31,58	20,92
0,55	30,16	12,67	38,49	59,63	0,3901	0,6978	4,941	8,838	32,9	21,24
0,55	31,37	12,92	37,75	60	0,3977	0,6935	5,139	8,961	34,22	21,53
0,55	32,58	13,16	37,01	60,34	0,4057	0,6896	5,338	9,073	35,54	21,8
0,55	33,79	13,37	36,27	60,65	0,414	0,6861	5,536	9,175	36,87	22,05
0,55	35	13,57	35,53	60,93	0,4226	0,683	5,734	9,267	38,19	22,27

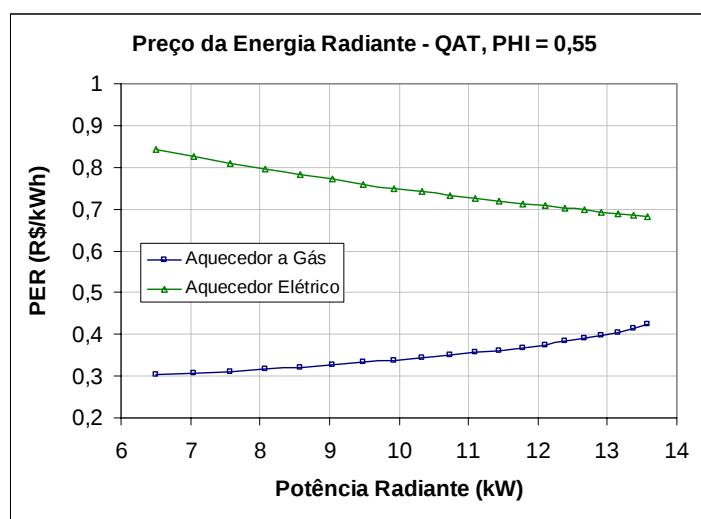


Figura 3 - Preço da energia radiante (PER). Comparação entre o queimador poroso para altas temperaturas (QAT) e o aquecedor elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000).

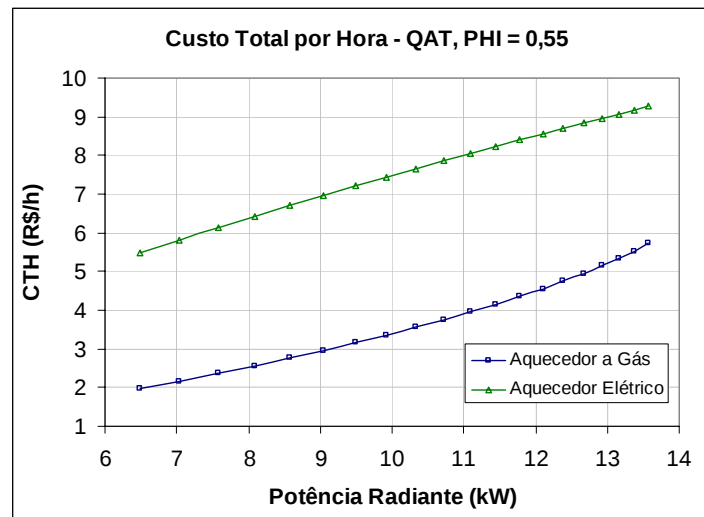


Figura 4 - Comparação do custo total por hora de operação (CTH) para os dois aquecedores em estudo. Comparação entre o queimador poroso para altas temperaturas (QAT) e o aquecedor elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000).

Uma instalação comercial (câmara de secagem de tinta, por exemplo) com apenas 10 queimadores porosos como o que está sendo analisado, operando em 9 kW radiante 6 horas por dia e 25 dias por mês, traria uma economia anual de mais de R\$ 72.000,00 se comparado com a mesma instalação operando com aquecedores elétricos.

A mínima potência radiante alcançada pelo queimador de alta temperatura é de 4,6 kW em $\Phi = 0,46$ e $uch = 10$ cm/s. Neste ponto, o PER para o queimador foi de 0,30 R\$/kWh, enquanto que para o aquecedor elétrico foi de 0,91 R\$/kWh. O CTH foi de R\$ 1,38 para o queimador e R\$ 4,24 para o aquecedor elétrico.

A máxima potência radiante alcançada pelo queimador de alta temperatura é cerca de 15,7 kW em $\Phi = 0,60$ e $uch = 45$ cm/s. Neste ponto, o PER para o queimador foi de 0,51 R\$/kWh, enquanto que para o aquecedor elétrico foi de 0,65 R\$/kWh. O CTH foi de R\$ 8,01 para o queimador e R\$ 10,23 para o aquecedor elétrico. Nota-se que em potências radiantes muito elevadas os custos de operação com os dois equipamentos se aproximam. Isto ocorre porque a eficiência de radiação do queimador poroso diminui com a potência, enquanto que a do aquecedor elétrico aumenta.

Para potências radiantes baixas uma análise idêntica foi feita baseada nos dados do queimador poroso de baixa e média temperatura com $\phi = 0,60$ e uch entre 4 e 20 cm/s. As figuras 5 e 6 mostram a comparação do preço da energia radiante e do custo total por hora de operação entre o queimador poroso para baixa e média temperatura (QBT) e o aquecedor elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000). Novamente a operação com o queimador poroso mostra-se vantajosa em relação ao aquecedor elétrico em toda a faixa de operação.

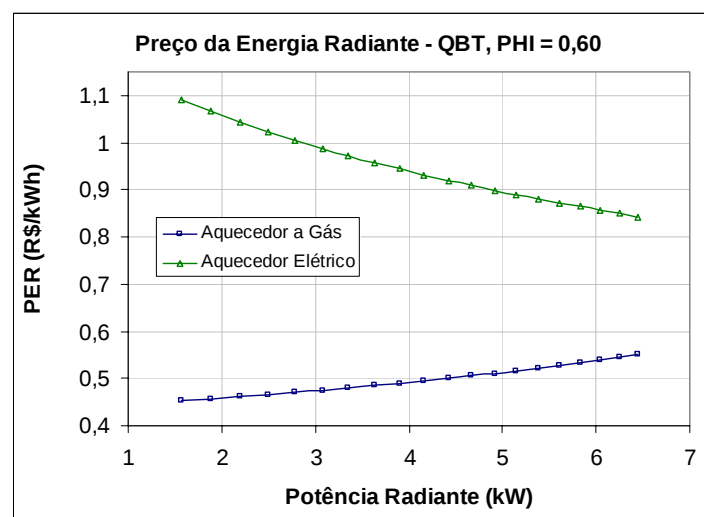


Figura 5 - Preço da energia radiante (PER). Comparação entre o queimador poroso para baixa e média temperatura (QBT) e o aquecedor elétrico estudado por Petterson e Stenström (2000).

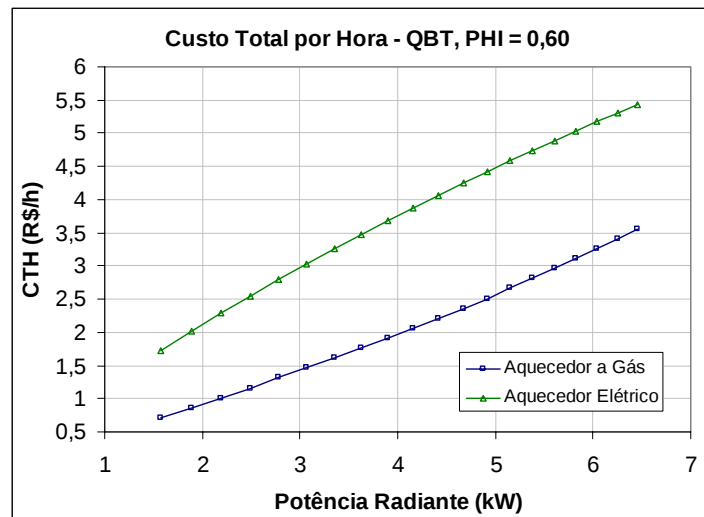


Figura 6 - Comparação do custo total por hora de operação (CTH) para os dois aquecedores em estudo. Comparação entre o queimador poroso para baixa e média temperatura (QBT) e o aquecedor elétrico estudado por Peterson e Stenström (2000).

3. Conclusões

A avaliação técnico-econômica realizada mostra que a aplicação de queimadores porosos radiantes em substituição aos aquecedores elétricos convencionais trás vantagens financeiras significativas.

É interessante notar que 50 a 70% da energia produzida pelo queimador poroso é rejeitada na forma de gases da combustão a altas temperaturas (500 a 1200°C). Estes gases podem ser desviados de forma a não entrar em contato com a carga, nos casos em que este contato traga prejuízos ao acabamento superficial, ou podem ser também aproveitados tanto na aplicação em questão como em outras aplicações que demandem energia térmica convectiva. A utilização desta parcela elevará consideravelmente a eficiência global do sistema tornando o uso dos queimadores radiantes ainda mais interessante.

4. Referências

- Jornal Informaq No. 61, dez 2003, disponível em: http://www.abimaq.org.br/informaq_show.asp?id=441
- Gás IR Paper Drying Consortium, 2004, disponível em: <http://www.energysolutionscenter.org/GasIRPaper/>
- KUANG H., THIBAUT, J., CHEN, R., GRANDJEAN, B. P. A., "Pilot scale investigation of infrared drying of paper", TAPPI Journal, Vol. 78, No. 7, 1995.
- YAGOOBI, J. S.; SIKIRICA, S. J.; RICKS, M. R.; "On-line pre-heating-drying of paper sheet with gas-fired infrared emitters", TAPPI Vancouver, 2000.
- PETTERSON, M.; STENSTRÖM, S.; "Experimental evaluation of electric infrared dryers", TAPPI Journal Peer Rewied Paper, 2000.
- Site Companhia de Gás de Santa Catarina – SCGÁS, 2004, disponível em: <http://www.scgas.com.br/>
- Site Centrais Elétricas de Santa Catarina – CELESC, 2004, disponível em: <http://www.celesc.com.br/>
- PEREIRA, F. M.; DADAN, A P.; OLIVEIRA, A. M.; BAZZO, E.; "Avaliação da eficiência energética de fornos a rolo da indústria de cerâmica branca", Relatório de pesquisa, LabCET/UFSC, 2004.
- SALAZAR, J. P.; OLIVEIRA, A M.; "Convective and radiative heat transfer in a roller kiln for ceramic tiles manufacture – a 2D model", a ser publicado em 2005.
- CATAPAN, R.; PEREIRA, F. M.; OLIVEIRA, A M.; "Relatório de caracterização de queimadores porosos radiantes de alta temperatura", relatório entregue à RedeGás Energia, 2004.
- CATAPAN, R.; PEREIRA, F. M.; OLIVEIRA, A M.; "Relatório de caracterização de queimadores porosos radiantes de baixa temperatura", relatório entregue à RedeGás Energia, 2004.