

## SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE PANEAS OXICOMBUSTÃO\*

Tiago Ribeiro Costa<sup>1</sup>  
Pedro Athias Zagury<sup>2</sup>  
Pablo Pacheco da Gama<sup>3</sup>  
Enderson Silva Gomes<sup>4</sup>  
João Paulo Silva<sup>5</sup>  
Vitor Zanotelli<sup>6</sup>

### Resumo

A otimização da matriz energética na produção de metais tem sido um dos tópicos predominantes mundialmente. Um dos principais consumidores ineficientes de energia, em alguns casos impactando inclusive no consumo de fornos elétricos são os sistemas de aquecimento de panelas. Buscando novas alternativas de redução de custos de energia, e redução de emissões, a White Martins encontrou uma alternativa técnica aos convencionais Pré-Aquecedores de panelas ar-gás. É o Sistema de Aquecimento de Panelas Oxidocombustão com queimador Optifire, que utiliza oxigênio puro como comburente ou ar enriquecido. Comparado ao sistema ar-gás convencional, é possível promover uma economia de combustível de até 50% e redução de emissões de carbono e NOx. A tecnologia do equipamento consiste em realizar a queima estequiométrica balanceada, através da medição precisa dos gases, utilizando queimadores avançados com maior eficiência e melhorando a distribuição de calor, de forma a não gerar diferenças de temperatura entre seções. Com a tecnologia Optifire é possível inclusive o remanejamento de combustível mais nobre, como gás de coqueria em processos como aquecimento de regeneradores de altos-fornos. Este trabalho descreverá o estudo da oportunidade e dimensionamento para aquecedores de panela.

**Palavras-chave:** Aquecedor de panelas; Oxidocombustão; Emissões; Economia de Energia.

### OXY-FUEL LADLE PREHEATING SYSTEM

#### Abstract

The optimization of the energy matrix in the production of metals has been one of the predominant topics worldwide. One of the main inefficient consumers of energy in the production of metals, in some cases impacting even the consumption of electric furnaces is the Ladle Preheating Systems. Seeking for new alternatives to reduce energy costs and emissions, White Martins has found a technical alternative to conventional air-gas Ladle preheaters. It is the Oxy-fuel Ladle Preheating System with Optifire burner, which uses pure oxygen as comburent or enriched air. Compared to the conventional air-gas system, it is possible to promote a fuel economy up to 50% and reduce carbon and NOx emissions. The Equipment technology consists of performing balanced stoichiometric firing by accurate gas measurement and using advanced burners with greater efficiency and improving the distribution of heat, the Ladle, Avoiding temperature differences between sections. With the Optifire technology it is even possible to relocate more noble fuel, such as coke oven gas in processes such as heating blast furnace Stove. This paper will describe the study of the opportunity and dimensioning for Ladle preheaters

**Keywords:** Ladle preheater; oxy-fuel; emissions; energy savings.

<sup>1</sup> Técnico e Engenheiro Mecânico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Tecnologias e Aplicações, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Técnico e Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Químico e Mestre em Engenharia Térmica, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro Químico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A otimização da matriz energética em siderúrgicas tem sido um dos tópicos predominantes mundialmente. Em siderúrgicas onde o uso de combustíveis não gerados internamente é praticado, oxidação torna-se uma solução técnica e economicamente atrativa e viável para eliminação de combustíveis externos tais como óleo combustível, gás natural ou gás liquefeito de petróleo. Em processos como aquecimento de panelas, fornos poço, fornos de forjaria e fornos contínuos de reaquecimento é possível a substituição total de combustível externo por oxigênio e combustível de menor poder calorífico tais como gás de alto-forno, gás de coqueira ou gás de aciaria. Remanejamento de combustível mais nobre gerado internamente, como gás de coqueira, pode ser executado através da substituição do mesmo por oxigênio e gás de alto-forno em processos como aquecimento de regeneradores de altos-fornos. A aplicação de oxidação nestes processos através da tecnologia OPTIFIRE da Praxair/White Martins traz benefícios adicionais como melhor uniformidade de temperatura, redução de emissão de poluentes, além da redução do custo energético e otimização da matriz energética. Neste trabalho são apresentados resultados obtidos com a tecnologia OPTIFIRE em processos de aquecimento de panelas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente é realizado um cálculo de balanço térmico do sistema a ser substituído para estimar a quantidade de oxigênio necessária e a economia de gás que pode ser gerada, considerando apenas a substituição do comburente. Temos aqui como exemplo um sistema que opera com 2MW de potência:

Composição da Chama			
Descrição	Unid	Oxyfuel	Caso Base
FLOW RATE	Nm <sup>3</sup> /h	124	200
HHV	kcal/Nm <sup>3</sup>	9.872	9.872
LHV	kcal/Nm <sup>3</sup>	8.981	8.981
FUEL TEMPERATURE	oC	30	30
AVERAGE MOLECULAR MASS	g	17,745	17,745
O <sub>2</sub> CONCENTRATION IN OXIDANT	% vol	93,0	20,9
LAMBDA (λ)		1,000	1,000
STOICHIOMETRIC O <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	2,082	2,082
OXIDANT	Nm <sup>3</sup> /h	279	1.993
AIR	Nm <sup>3</sup> /h	25	1.993
OXYGEN	Nm <sup>3</sup> /h	254	0
OXYGEN	tpd	9	0
OXIDANT TEMP.	oC	30	30

Tabela 1 – Estudo de balanço térmico da chama

Balanço de Energia			
Descrição	Unid	Oxyfuel	Caso Base
ENERGY INPUT VIA FUEL OIL	Mcal/h	0	0
ENERGY INPUT VIA FUEL GAS	Mcal/h	1.229	1.974
ENERGY INPUT VIA PREHEATED FUEL GAS	Mcal/h	1	2
ENERGY INPUT VIA OXIDANT INJECTION	Mcal/h	0	0
ENERGY INPUT VIA WATER INJECTION	Mcal/h	0	0
ENERGY INPUT VIA CO2 INJECTION	Mcal/h	0	0
ENERGY OUTPUT VIA FLUE GAS	Mcal/h	317	1.066
ENERGY OUTPUT VIA ASH	Mcal/h	0	0
NET HEAT AVAILABLE	Mcal/h	914	914
OVERALL THERMAL EFFICIENCY		0,74	0,46

Tabela 2 – Comparativo de balanço de energia teórico

Com o balanço energético, é possível entender qual seria a vazão de oxigênio necessária e qual seria a nova vazão de gás natural para que possamos atingir a mesma quantidade de energia disponível. Estes valores são a base para dimensionar o equipamento que fará o controle de gases para o novo sistema.

O segundo passo é a seleção e projeto do queimador. Neste exemplo utilizamos um queimador de chama estagiada, chamado de queimador Optifire JL.

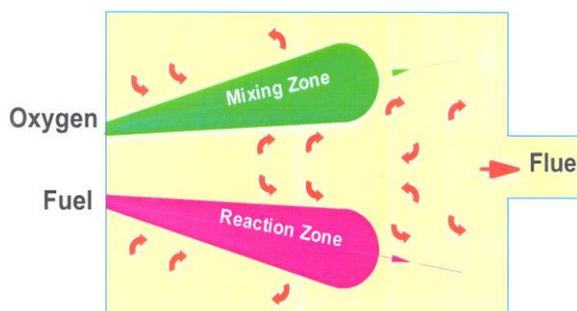


Figura 2.a – Conceito de chama estagiada

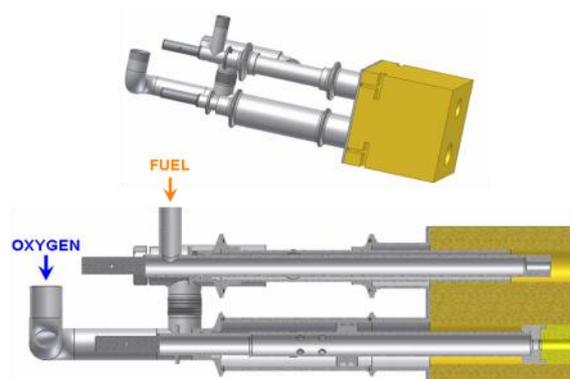


Figura 2.b – Queimador Optifire J/L

O queimador Optifire JL detém uma tecnologia de estagiamento de chama, onde ocorre a Injeção separada de parte do comburente, produzindo uma chama com baixa temperatura de pico com distribuição de calor mais uniforme, além de menos emissões de NOx devido a menor temperatura adiabática da chama.

Através do dimensionamento dos bocais da lança de oxigênio e do queimador principal, é possível ajustar o comprimento e largura de chama, de forma a ter a chama adequada às dimensões da panela. Com as dimensões da panela em mãos, fazemos este detalhamento. Na figura abaixo, temos os detalhes do queimador desmontado e montado ao lado.

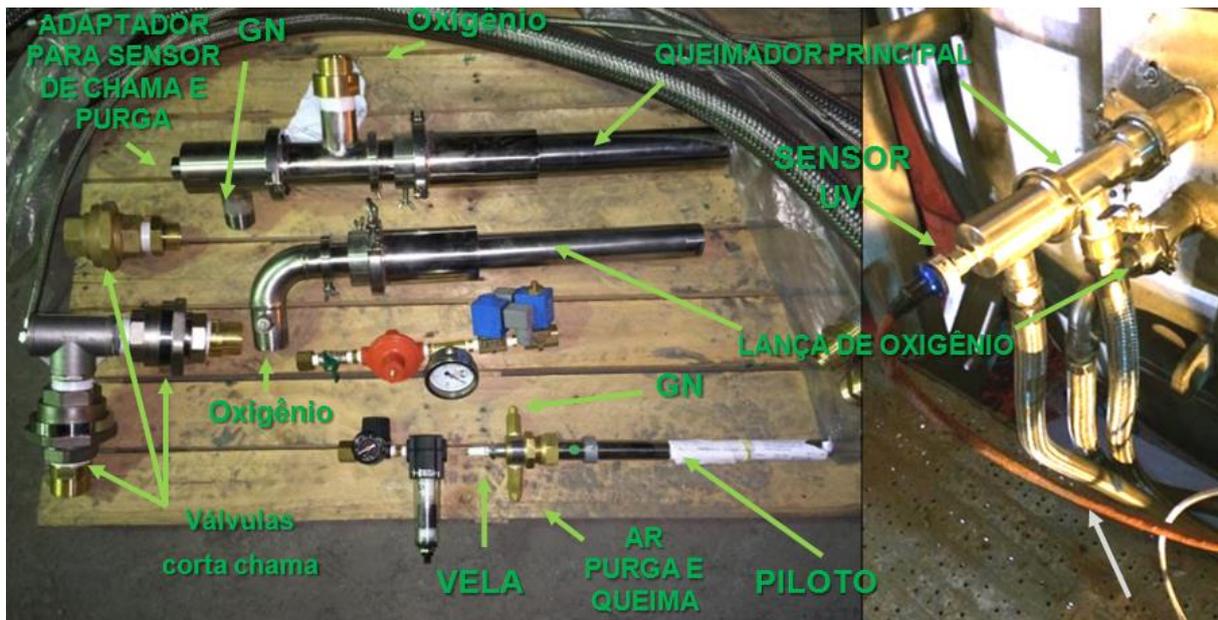


Figura 2.c – Componentes do queimador Optifire

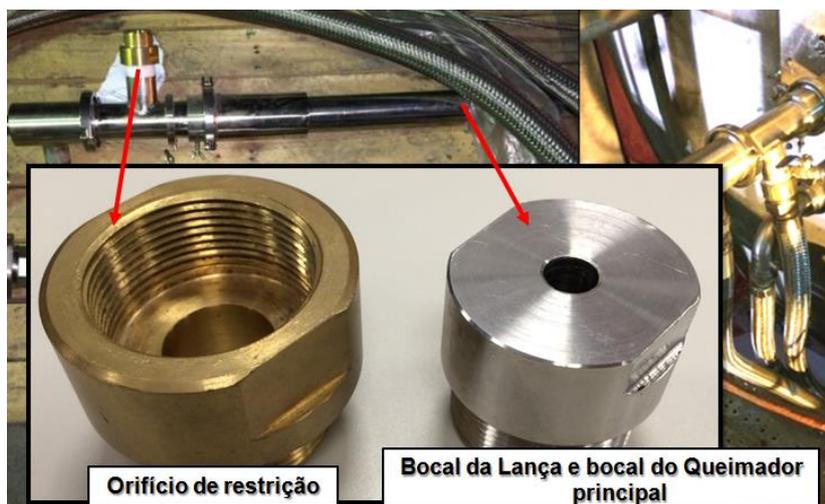


Figura 2.d – Orifício de restrição e bocal para ajuste de estagiamento e largura de chama

Fornecido já com bloco refratário adequado a atmosfera da nova chama, o conjunto é adaptado ao aquecedor a ser convertido, conforme projeto abaixo:

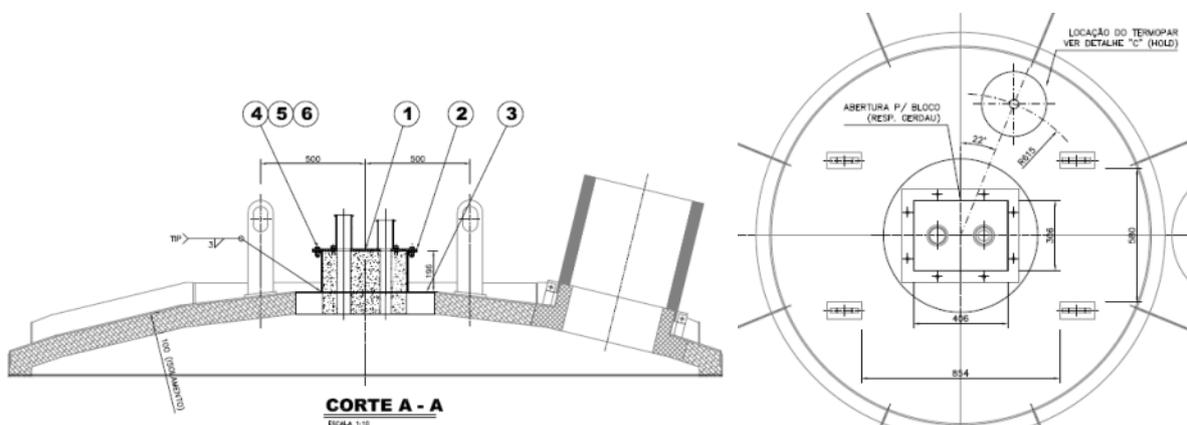


Figura 2.e – Desenho de indicação das modificações para receber conjunto Optifire



Figura 2.f – Vista da face quente do aquecedor de painelas

Devido à redução no volume de gases com a conversão, é utilizado um soprador de ar para auxiliar na distribuição de calor até a temperatura de 600°C. Também é realizada a restrição da saída original de exaustão de gases em 60% para ajustar ao novo volume de gases e dessa forma manter a pressão positiva dentro da panela, evitando a admissão de ar falso.

Com base nas vazões obtidas com o estudo de balanço térmico VS o dimensionamento do queimador com base nas dimensões da panela, chegamos às vazões necessárias para o equipamento. Seguindo as melhores práticas de fabricação e atendendo às mais rígidas normas de segurança, como a NBR12313, projeta-se um skid de controle de válvulas para oxigênio e gás natural neste exemplo, para controle dos gases de combustão. Acoplado ao skid, um painel elétrico dotado de um controlador lógico programável (PLC) e uma IHM para operação local (Conforme norma). O equipamento é projetado de forma a ser compacto o suficiente para não impactar a área do cliente.



Figura 2.g – Skid de válvulas para controle

Dentro do programa, uma tela para programar a receita de rampa de aquecimento, de forma a ajustar conforme especificado pelo fabricante do refratário. No software exemplificado abaixo, é possível programar até 10 curvas com até 10 steps de temperatura com taxas de aquecimento diferentes.

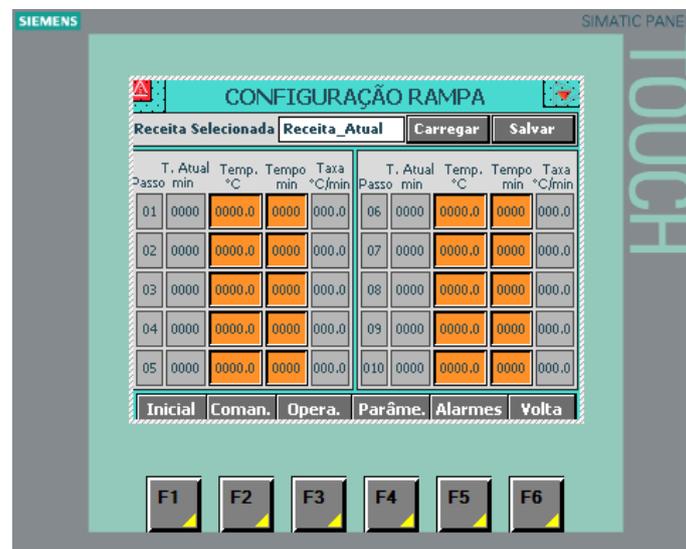


Figura 2.h – Tela de configuração de receitas

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Melhor Eficiência da Combustão.

A combustão com oxigênio é mais eficiente do que a combustão com o ar. As perdas de energia para os gases gerados na combustão são consideravelmente menores devido à menor presença de inerte (nitrogênio). Com isso, para obter a mesma energia livre para aquecimento de um sistema, é necessária uma quantidade

de combustível bastante inferior. No caso do pré-aquecimento de painéis, o consumo de combustível com a oxidação será 50% inferior em relação à combustão entre ar e gás natural.

Utilizando instalações laboratoriais, em parceria com o IPT, a White Martins desenvolve e testa novas tecnologias de queimadores que serão utilizadas nos clientes. Nestas instalações, com fornos que simulam condições de campo, é possível efetuar a leitura dos gases de suprimento e análise dos gases da exaustão. Com essas informações é possível obter a eficiência da combustão e de emissões.



Figura 3.a – Laboratório de Combustão

### 3.2 Redução das Emissões de Carbono para a Atmosfera.

Além de maior eficiência, a combustão com o oxigênio também é mais limpa do que a combustão com o ar. A quantidade de CO<sub>2</sub> gerada é significativamente inferior, como mostrado na Figura 3.a (Volume de gases gerados para a obtenção de 1 x 10<sup>6</sup> kcal de calor disponível na combustão de metano, considerando a temperatura do ar a 21,1°C e dos gases de combustão a 1.148,9°C). A redução das emissões é da ordem de 50%, proporcional a economia de combustível atingida.

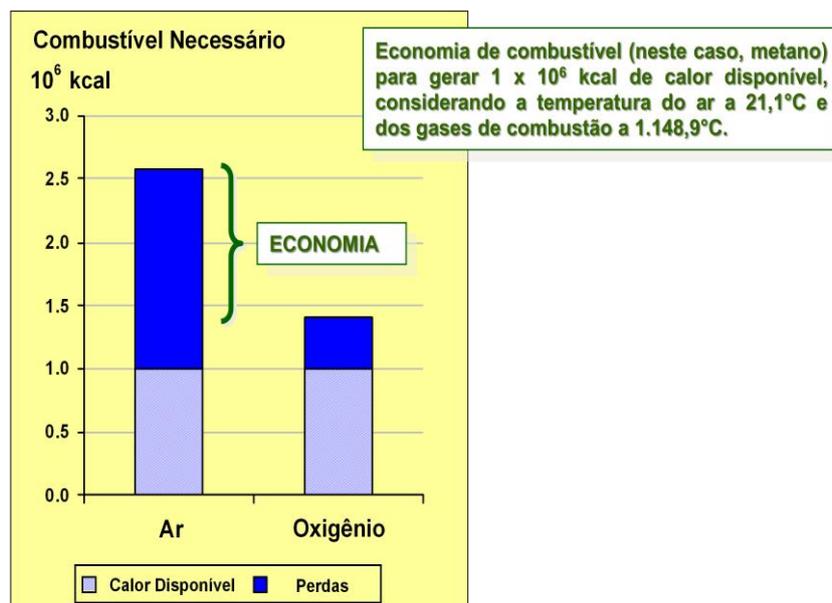


Figura 3.b – Redução das Emissões

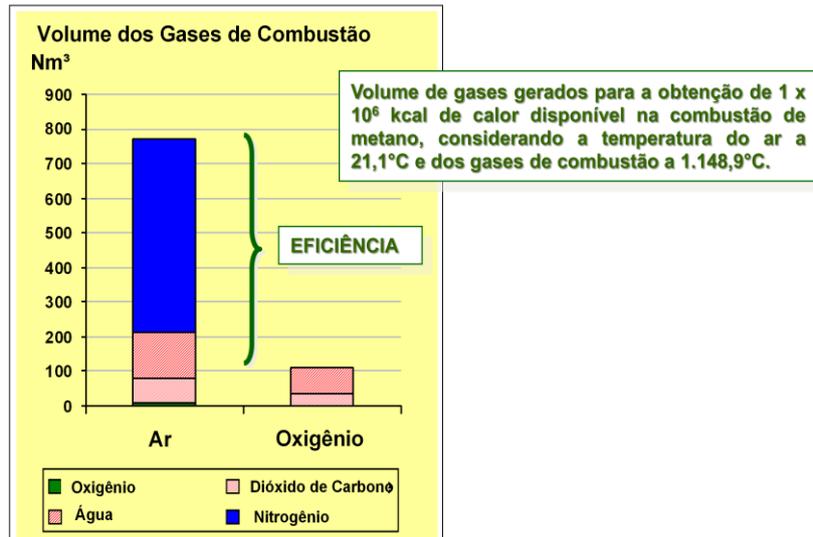


Figura 3.c – Volume de Gases Gerado

### 3.3 Redução no Desgaste do Revestimento Refratário das Painelas

Um sistema de aquecimento de painelas ineficiente pode não permitir que as painelas atinjam a temperatura adequada de pré-aquecimento antes de receber o aço líquido. Quando isso ocorre, a integridade do revestimento é comprometida, reduzindo sua vida útil. Portanto, é de vital importância garantir que as painelas estejam adequadamente pré-aquecidas para preservar o revestimento refratário.

Outro problema da ineficiência do sistema de aquecimento é o controle inadequado da relação combustível-comburente. Esse controle pode levar a um excesso de oxigênio na combustão, outro causador de desgaste nos refratários. O controle relação combustível-comburente com o uso de oxigênio puro ao invés do ar é mais eficiente, reduzindo o excesso de oxigênio na combustão e contribuindo para menor desgaste do revestimento refratário das painelas.

Outro importante fator que impacta diretamente na vida útil do refratário das painelas é a qualidade da chama do aquecedor. Uma chama desbalanceada pode vir a superaquecer certas áreas mais que outras. Um problema comum em aquecedores verticais é a chama curta e sem firmeza, que acaba por superaquecer a região da linha de escória da painela, gerando uma fragilização na superfície do refratário. Já a seção do fundo da painela é penalizada neste instante por não receber o aquecimento adequado neste início da curva de aquecimento, recebendo um choque de temperatura nos steps seguintes da curva de temperatura. A chama balanceada do queimador JL desenvolvido pela White Martins é dura e promove uma correta distribuição de calor junto com o soprador de ar convectivo nas etapas iniciais de aquecimento. Desta forma mesmo em temperaturas inferiores iniciais do aquecimento, podemos observar uma boa distribuição de temperatura.



Figura 3.d – Chama Argás



Figura 3.e – Chama Oxigás



Figura 3.f – Painel Totalmente Encharcada

Um dos métodos utilizados para analisar a distribuição de temperatura e encharque é através da medição da temperatura externa da Painel. Abaixo podemos ver uma medição da temperatura da painel através da carcaça. É possível notar uma boa distribuição da temperatura:

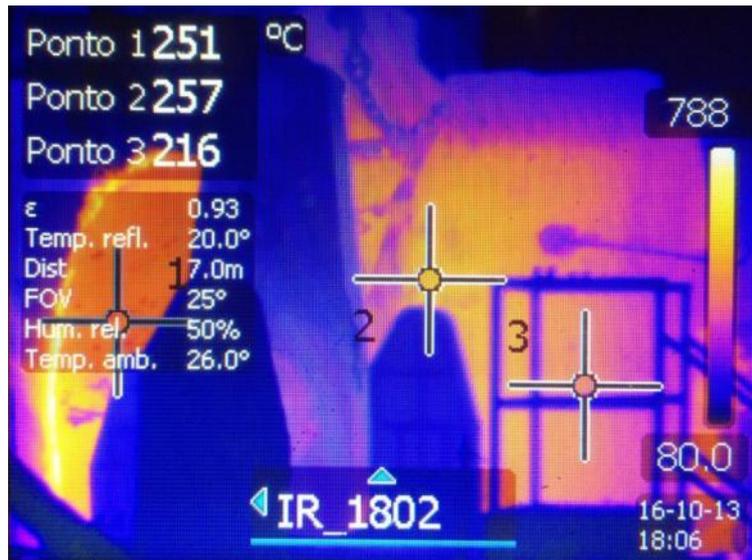


Figura 3.g – Termografia da carcaça de uma panela na horizontal

Nas imagens abaixo a medição da temperatura da bica de vazamento da panela. Este é um ponto muito importante no aquecimento de panelas. É necessário alcançar o patamar de temperatura adequado neste ponto para poder fazer a montagem na válvula de fundo. Em aquecedores horizontais e verticais este ponto é crítico e representa bem o encharque do fundo da panela.



Figura 3.h – Válvula gaveta fria

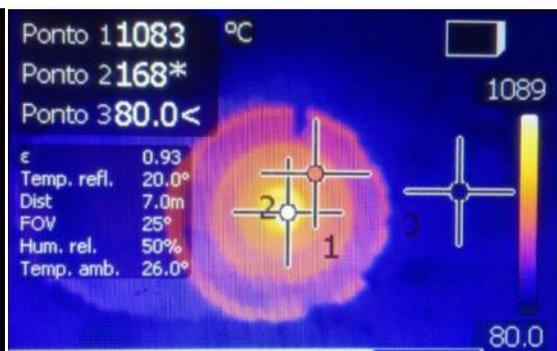


Figura 3.i – Válvula gaveta aquecida

No exemplo abaixo, utilizando termopares instalados ao longo da panela de aço, foi possível comprovar o alcance de temperaturas ao longo da Panela, no tempo adequado a curva de temperatura exigida pelo refratário, trazendo ganhos de produtividade por disponibilizar em tempo adequado a panela de aço para o ciclo de uso.

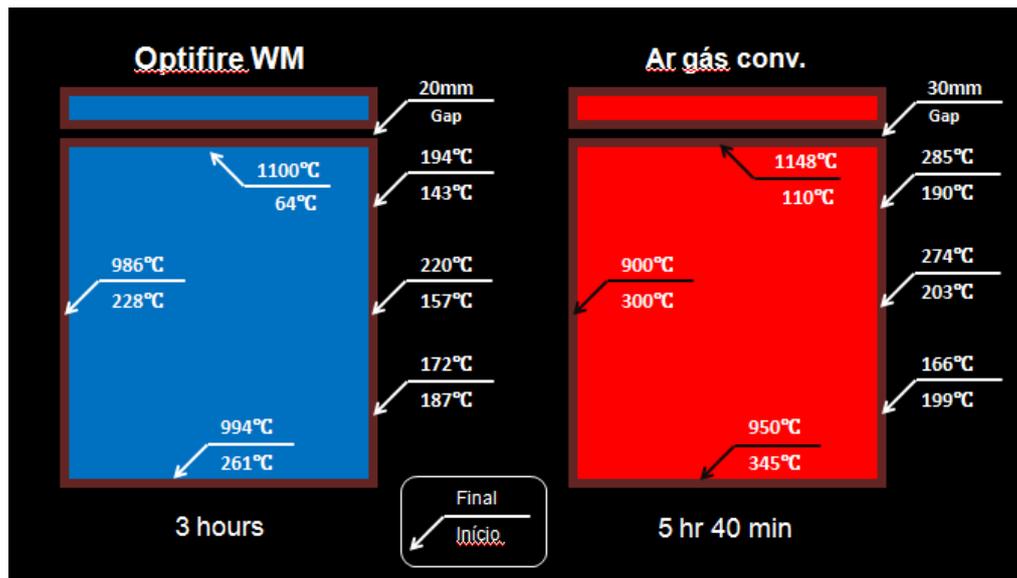


Figura 3.j – Medição de temperatura de Panela em aciaria no Japão (AISTech 2011)

### 3.4 Redução de Consumo de Combustível

	Consumo Arcombustão	Queimador Optifire J/L
Consumo de Gás (NM3)	440	184
Consumo de O2 (NM3)	0	459
Tempo de Aquecimento	5 H 40 M	3 H 0 M
Temperatura de fundo no começo	345° C	261° C
Temperatura de fundo ao final	950° C	994° C

Tabela 1 – Redução de 58,2% de consumo de combustível em Aciaria no Japão

Em medições de diferentes clientes, obtivemos um resultado de economia de combustível com o sistema de aquecimento de painéis oxcombustão, entre 43 a 58%. Esse valor varia em função não só do consumo específico em si, porém também com a eficiência do controle de temperatura do equipamento, que consegue manter de forma mais eficiente a temperatura. Comparado o sistema a aquecedores sem controle preciso de vazão ou curva de temperatura, a diferença é maior.

Nas figuras abaixo, veremos a diferença em um cliente, onde não somente foi possível uma redução de 50% de consumo de combustível, como também obtemos outros ganhos indiretos, pois o sistema anterior não gerava o encharque completo da panela de fundição. No caso base, 3 maçaricos com 15 Nm<sup>3</sup>/h foram substituídos por 1 estação com 1 queimador com 18 Nm<sup>3</sup>/h. Um conjunto de melhor controle estequiométrico, instalação de escudo térmico e a adoção do queimador Optifire J, contribuíram para este resultado:



Figura 3.k – Painéis com maçaricos

Figura 3.l – Painel em estação de aquecimento oxigás

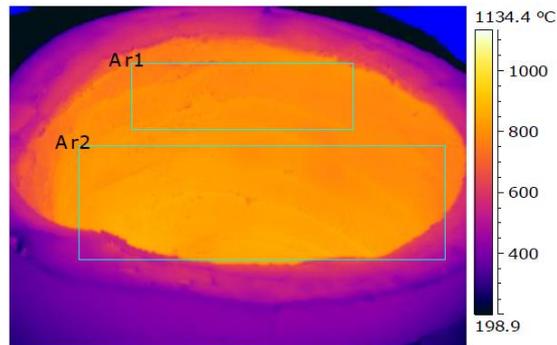


Figura 3.m – Termografia do interior da painela (1000°C)

## 4 CONCLUSÃO

Detendo um conhecimento mais amplo de controle de gases de combustão e utilizando uma estrutura laboratorial de desenvolvimento de produtos, a White Martins/Praxair conseguiu em parceria com seus clientes, desenvolver uma leitura mais completa das necessidades para melhorar o desempenho de aquecedores de painela, além de aliar as vantagens do uso do oxigênio como comburente puro para combustão mais eficiente. Este trabalho culminou em uma solução competitiva, com redução direta no consumo de energia da aciaria.

Com preços cada vez mais elevados de combustíveis, esta solução torna-se cada vez mais atrativa, com um retorno financeiro do investimento em prazos reduzidos.

## Agradecimentos

Agradeço aos clientes e parceiros White Martins, que auxiliaram compartilhando dados para nossa pesquisa, e que acreditaram no nosso produto. Agradeço a White Martins por ter incentivado o trabalho de desenvolvimento de tecnologias e fomentado o empreendimento e à ABM por disponibilizar o espaço para compartilharmos este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 AISTech 2011: Larry Cates. Performance and Results of Praxair's DOC Technology for Ladle Preheating at Steel Mill in Japan. 2011
- 2 Riley, M., Kobayashi, H., Deneys, A. (2001). "Praxair's Dilute Oxygen Combustion Technology for Pyrometallurgical Applications," JOM 53:5 pp. 21-24.
- 3 NBR12313: ABNT – Associação de Normas Técnicas, Sistema de combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. 2000; 2-33