Implantação de Controle Automatizado no Sistema de Combustão de uma Caldeira Industrial

REVISTA ELETRÔNICA MULTIDISCIPLINAR
UNIFACEAR

Evandro de Souza[1]; Heryk do Prado de Andrade[1]; Leandro Decolin[1]; Allan Christian Krainski Ferrari[1]
[1]*Centro Universitário - UNIFACEAR*

RESUMO

No universo de uma indústria, seja ela pequena ou de grande porte, as possibilidades de aplicação dos conceitos de eficiência energética são bem amplos. Um dos principais vilões, quando se trata de economia industrial, é o sistema de geração de vapor mais conhecido como caldeira. Baseando-se nesses conceitos este trabalho apresenta uma proposta de aumento da eficiência da geração de vapor em uma caldeira industrial, através da implantação de um controle automatizado no sistema de combustão da mesma. A solução apresentada neste trabalho foi norteada pelo estudo do princípio de funcionamento da caldeira e de todos os sistemas de controle que a integram. Com os dados de funcionamento da caldeira foi possível modelar matematicamente o sistema. Isso se deu através da utilização de um algoritmo computacional de otimização que possibilitou a simulação e implantação do controle PID utilizado nesta aplicação. Definido o tipo de controle, foram realizadas todas as alterações no projeto elétrico do sistema de combustão e assim conseguiu-se implantar o controle automatizado para o sistema de combustão da caldeira. Por fim conseguiu-se comprovar a efetividade das alterações observando-se uma redução de aproximadamente 10% no consumo específico de gás natural da caldeira.

Palavras chave: Eficiência energética. Caldeira industrial. Sistema de combustão. Controle PID.

ABSTRACT

In the universe of an industry, whether small or large, the possibilities for applying energy efficiency concepts are quite wide. One of the main villains when it comes to industrial economics is the steam generator system better known as the boiler. Based on these concepts, this work presents a proposal to increase the efficiency of steam generation in an industrial boiler, through the implementation of an automated control in the combustion system of the same. The solution presented in this work was guided by the study of the boiler operating principle and all the control systems that integrate it. With the boiler operating data it was possible to mathematically model the system. This was achieved through the use of a computational optimization algorithm that enabled the simulation and implementation of the PID control used in this application. Once the type of control was defined, all changes were made to the electrical design of the combustion system and thus the automated control for the boiler combustion system was implemented. Finally, it was possible to prove the effectiveness of the alterations by observing a reduction of approximately 10% in the specific natural gas consumption.

Keywords: Energy efficiency. Industrial boiler. Combustion system. PID control.

1. INTRODUÇÃO

O interesse crescente das indústrias em reduzir seus custos operacionais e consequentemente aumentar suas margens de lucro fazem crescer dia após dia os

investimentos voltados para melhoria dos processos com foco em: eficiência energética, qualidade, disponibilidade e redução da poluição.

Frente ao exposto, este trabalho visa desenvolver e implantar uma solução automatizada para o controle do sistema de combustão de uma caldeira de uma indústria siderúrgica localizada na região metropolitana de Curitiba-PR.

O objetivo da pesquisa foi identificar quais variáveis do sistema de combustão dessa caldeira poderiam influenciar na redução da eficiência energética da mesma, e como um controle automatizado implantado nesse mesmo sistema poderia contribuir para aumentar a eficiência energética do equipamento e assim diminuir o consumo específico de combustível relacionado à produção de aço dessa empresa.

O principal resultado deste trabalho foi o desenvolvimento e implantação de uma solução automatizada para o controle do sistema de combustão de uma caldeira industrial, com a aplicação de equipamentos certificados nas normas NR-13 (Caldeiras e Vasos de Pressão) e NBR-12313 (Sistema de Combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura).

2. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção será apresentada a caldeira que foi objeto de estudo deste trabalho, será possível visualizar os principais sistemas que compõem este equipamento e como os mesmos funcionam.

2.1 CALDEIRA

A caldeira responsável por fornecer vapor em quantidade suficiente para os processos produtivos da empresa em questão pode ser observada na FIGURA 1.

FIGURA 1 – CALDEIRA FOCO DO TRABALHO



FONTE: OS AUTORES (2019)

Na TABELA 1 são apresentadas as principais características dessa caldeira.

TABELA 1 – CARACTERISTICAS DA CALDEIRA DO ESTUDO

FABRICANTE	AALBORG
ANO DE FABRICAÇÃO	2002
CATEGORIA	B
MODELO	MISSION 3 PASS 6,5G
TIPO DE CALDEIRA	FLAMOTUBULAR
CLASSIFICAÇÃO DO VAPOR PRODUZIDO	SATURADO
CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR	6.500 kg/h
PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL (PMTA)	170 PSI (11,95 kgf/cm²)
PRESSÃO DO TESTE HIDROSTÁTICO	256 PSI (18,00 kgf/cm²)
COMBUSTÍVEL	GÁS NATURAL
CAPACIDADE DO QUEIMADOR	5.230.000 kcal/h
POTÊNCIA DO SOPRADOR DE AR DE COMBUSTÃO	25 CV (18,4 kW)

FONTE: AALBORG (2002)

2.2 PRINCIPAIS SISTEMAS DE CONTROLE DA CALDEIRA

A seguir são apresentados os principais sistemas de controle presentes nessa caldeira. As variáveis mais importantes para a operação segura dela são: nível e qualidade de água, controle de combustão para aquecimento e pressão do vapor produzido.

2.2.1 SISTEMA DE ÁGUA

O principal insumo para a geração do vapor é a água. Para uma operação com eficiência e segurança é necessário um controle eficiente do nível da mesma no interior da caldeira e também a qualidade com que essa água é fornecida para a produção do vapor (BEGA, 2003, p. 113).

O controle do nível de água de uma caldeira, por se tratar de um item de grande importância para sua operação segura, se faz obrigatório. Sobre isso a Norma Regulamentadora n° 13 (1995, item 13.4.1.3e) define “As caldeiras devem ser dotadas de sistema automático de controle do nível de água com intertravamento que evite o superaquecimento por alimentação deficiente”.

2.2.2 SISTEMA DE PRESSÃO

Como visto anteriormente a Norma Regulamentadora n° 13 (1995, item 13.4.1.1) define uma caldeira como o equipamento que gera vapor. Sendo assim a caldeira pode ser configurada para operar em dois modos distintos com relação ao vapor produzido:

a) produção constante: a caldeira vai disponibilizar para os consumidores sempre a mesma quantidade de vapor;
b) pressão constante: a caldeira vai disponibilizar para os consumidores o vapor sempre a uma pressão constante.

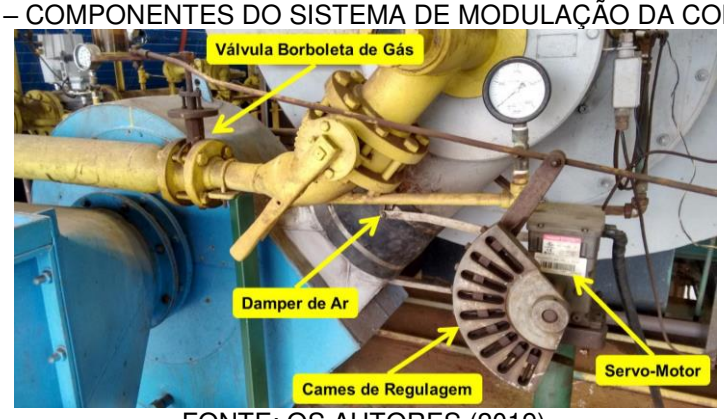
Essa caldeira opera em regime de pressão constante. Neste caso o controle de pressão tem um ajuste de *set-point* de 5,5 kgf/cm² (AALBORG, 2002, p.5).

2.2.3 SISTEMA DE COMBUSTÃO

Nos processos industriais, utiliza-se o queimador como dispositivo para a combustão. A função deste dispositivo é misturar o combustível e o ar de combustão em proporções dentro da faixa de inflamabilidade, possibilitando a ignição e manutenção permanente da combustão, mantém a turbulência da mistura e fornece combustível e ar de combustão em taxas que permitem a combustão completa sem apagar a chama. (BEGA, 2003, p. 58).

A caldeira utiliza o gás natural como combustível e possui, um pressostato proporcional, um servo-motor, um damper para regulagem da vazão de ar de combustão, uma válvula borboleta, um conjunto de cames de regulagem com alavancas e outros dispositivos para regulagem da combustão. Os seguintes componentes para o controle da modulação da combustão pode ser observados na FIGURA 2:

FIGURA 2 – COMPONENTES DO SISTEMA DE MODULAÇÃO DA COMBUSTÃO



FONTE: OS AUTORES (2019)

Para se obter a combustão em condições seguras é necessário que o combustível utilizado, neste caso o gás natural, seja fornecido ao sistema dentro dos limites especificados pelo fabricante. Além disso, a NBR-12313 (2000, p. 4) define alguns

componentes obrigatórios para o controle e ajuste do gás natural fornecido para a queima em queimadores industriais.

3. METODOLOGIA

O presente estudo baseou-se primeiramente em descrever o funcionamento da caldeira e como se comportava o sistema de combustão da mesma. Com isso pôde-se definir as variáveis necessárias para se analisar quantitativamente os resultados de consumo específico de gás natural da caldeira antes e após a implantação do sistema automatizado assim como também possibilitou a construção de um modelo computacional que auxiliou essas análises. Por fim foram realizados vários testes experimentais para se chegar ao modelo mais adequado para se conseguir atingir o objetivo de aumentar a eficiência do sistema de combustão da caldeira.

3.1 COLETA DE DADOS

A coleta dos dados, em sua grande maioria foi realizada de maneira automática através do sistema de automação e de aquisição de dados já existente na empresa. O parque fabril da empresa onde a caldeira fica localizada é, em sua grande parte, todo automatizado através de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) que por sua vez são interligados à rede corporativa. Isso permite o acesso às informações dos diversos equipamentos industriais de maneira fácil e eficiente.

O sistema de aquisição de dados apresentado funciona de forma contínua, sendo assim foi estabelecido um período fixo para as amostragens desta pesquisa. O período de 01/05/2019 a 31/05/2019 foi definido para coleta de dados antes da implantação do controle e o período de 01/10/2019 a 31/10/2019 para definir a coleta após a implantação.

3.1.1 MEDIÇÃO DA PRESSÃO DO VAPOR

Para realizar a coleta dos dados da pressão de vapor produzido pela caldeira, de maneira automática, foi identificado que o atual sistema de monitoramento composto por um manômetro e por um pressostato proporcional não permitia tal condição. Isso devido ao fato de não estarem interligados ao CLP e também de os mesmos não permitirem esta interligação devido ao tipo de sinal de transmissão.

A solução desenvolvida foi a montagem, em paralelo ao sistema atual, de um transmissor de pressão interligado ao CLP. Dessa forma o transmissor de pressão teve a função de medir pressão interna da caldeira e enviar essas informações ao CLP, e assim

possibilitar a determinação da média da pressão de vapor produzido nessa caldeira durante o período do estudo.

3.1.2 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE GÁS CONSUMIDO

Para a realização da coleta dos dados de consumo de gás natural na caldeira, foi verificado que já existia estrutura para tal medição. A medição do consumo de combustível é realizada por um transmissor de vazão instalado na tubulação de gás que abastece a caldeira.

3.1.3 BANCO DE DADOS

Para aquisição das informações dos valores de pressão de vapor e da vazão de gás natural instalados na caldeira e interligados ao CLP, foi utilizado o *software ibaPDA Server®* versão 6.24.6 como banco de dados. Conhecido como *Process Dada Acquisiton* (PDA), esse *software* é responsável em fazer a conexão com o CLP, realizar a leitura das variáveis com uma amostragem mínima de 100 ms e armazená-las de forma contínua e de uma maneira segura para análises posteriores.

3.1.4 DADOS DE PRODUÇÃO

Uma informação muito importante para se conseguir obter a medição do consumo específico de gás natural na caldeira foi a obtenção dos dados de produção da linha produtiva que utiliza o vapor da caldeira como um de seus insumos. Esses dados foram obtidos através de *software* interno da empresa chamado Heimdall.

3.1.5 ANÁLISE DOS GASES DE COMBUSTÃO

A medição dos níveis de emissões de gases de combustão produzidos pela caldeira é bastante relevante para indicar se a queima do combustível está dentro dos parâmetros corretos.

No caso dessa caldeira o fabricante estabelece os limites considerados aceitáveis destes componentes presentes nos gases emitidos pela chaminé. Dentre eles podem-se destacar os componentes observados na TABELA 2.

TABELA 2– COMPOSIÇÃO DOS GASES DE COMBUSTÃO

COMPONENTE	VALORES LIMITES
OXIGÊNIO (O_2)	4 A 10%
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	< 10ppm
DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)	9 A 11%
TEMPERATURA DOS GASES NA CHAMINÉ	~ 200 °C

FONTE: AALBORG (2002)

Para a realização dessa coleta foi utilizado um analisador portátil de gases do fabricante Testo® modelo 350XL. Esse equipamento permite a obtenção da concentração dos principais componentes dos gases de combustão que são emitidos através da chaminé da caldeira.

3.2 IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

Após o estudo do funcionamento da caldeira foi identificado que a variável de entrada da planta é a vazão de gás e a variável de saída é a pressão de vapor produzido. Ou seja, uma alteração na vazão de gás produz uma variação da pressão produzida na caldeira. Analisando, porém, o modo de controle feito pelo sistema de combustão observa-se o contrário. A variável de entrada é a pressão (lida pelo pressostato proporcional) que aciona o servomotor para modulação da válvula de gás. Assim pode-se afirmar que o controle é feito em malha fechada com realimentação negativa.

Com essas informações foram realizadas a identificação e a obtenção da função de transferência característica do sistema da caldeira. Para isso foi utilizado o algoritmo de otimização de pastoreio do elefante.

3.2.1 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DE PASTOREIO DO ELEFANTE

Com o objetivo de realizar a identificação do sistema optou-se por aplicar o método heurístico conhecido como algoritmo de otimização de pastoreio do elefante (*EHO – Elephant Herding Optimization*) que, assim como outros, foram desenvolvidos como objetivo de resolver diversos tipos de problemas de otimização do mundo real (FERRARI *et.al*, 2018). Este algoritmo foi desenvolvido visando resolver problemas de otimização global.

O algoritmo EHO foi executado através do *software* MATLAB® e funciona definindo-se os tamanhos das amostras para a estimação e validação do modelo assim como também as variáveis de entrada e saída do processo. O resultado fornecido pelo algoritmo consiste nos coeficientes da função de transferência que demonstra o comportamento mais próximo do real do processo, ou seja, quando a resposta das variáveis reais e a resposta do modelo apresentam uma correlação próxima de 100%.

Aplicou-se o algoritmo EHO a essa amostra e obteve-se então uma correlação de 99,89% entre o modelo identificado e o processo real da caldeira.

Através da execução do algoritmo EHO no *software* MATLAB foi possível obter os coeficientes da função de transferência que representa matematicamente o processo de funcionamento da caldeira. Assim, a função de transferência que representa o funcionamento dessa caldeira foi definida como se observa na EQUAÇÃO 1.

$$G(z)=\frac{0,1915z^2-0,0017z+0,1181}{z^2-0,5314z-0,4597} \quad (1)$$

3.2.2 CONTROLE PID

Para a simulação do controle PID, visto que não é possível realizar este teste diretamente na caldeira devido à questões de segurança, foi utilizado o programa SIMULINK que faz parte do *software* MATLAB®. Com a função de transferência da EQUAÇÃO 1 foi possível montar e realizar as simulações necessárias. O objetivo dessa simulação foi obter os ganhos Kp, Ki e Kd que foram utilizados no projeto do sistema automatizado. A TABELA 3 mostra os ganhos obtidos depois da sintonia do PID.

TABELA 3 – GANHOS DO CONTROLADOR

GANHO PROPORCIONAL (Kp)	58,1
GANHO INTEGRAL (Ki)	1,02
GANHO DERIVATIVO (Kd)	0,12

FONTE: OS AUTORES (2019)

3.3 PROJETO

A pesquisa realizada durante o andamento deste trabalho proporcionou o conhecimento aprofundado do funcionamento de todos os sistemas que fazem parte da caldeira, em particular o sistema de combustão. Com isso a proposta para alteração do projeto da caldeira para a implantação de um controle automatizado do sistema de combustão da mesma se baseou em duas frentes:

a) instalação de um controlador industrial microprocessado no sistema de combustão da caldeira;
b) substituição do damper de ar de combustão por um inversor de frequência.

3.3.1 INSTALAÇÃO DO CONTROLADOR PID

Optou-se por utilizar um controlador digital microprocessado com PID integrado já utilizado em outros sistemas de combustão da empresa. O controlador utilizado no projeto foi o modelo UDC2500 do fabricante Honeywell. Esse controlador possui um algoritmo PID integrado além de uma entrada e uma saída analógica padrão 4 a 20 mA

3.3.2 CONTROLE DO AR DE COMBUSTÃO

O objetivo do projeto foi fazer com que a quantidade de ar fornecido ao sistema de combustão passasse a ser feita através da variação da velocidade do soprador conseguida através da instalação do inversor.

O inversor de frequência escolhido para esta aplicação é apresentado na FIGURA 3. No detalhe são verificadas as informações do inversor assim como também os dados de placa do motor do soprador de ar utilizados para sua especificação.

FIGURA 3 – INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZADO NO PROJETO



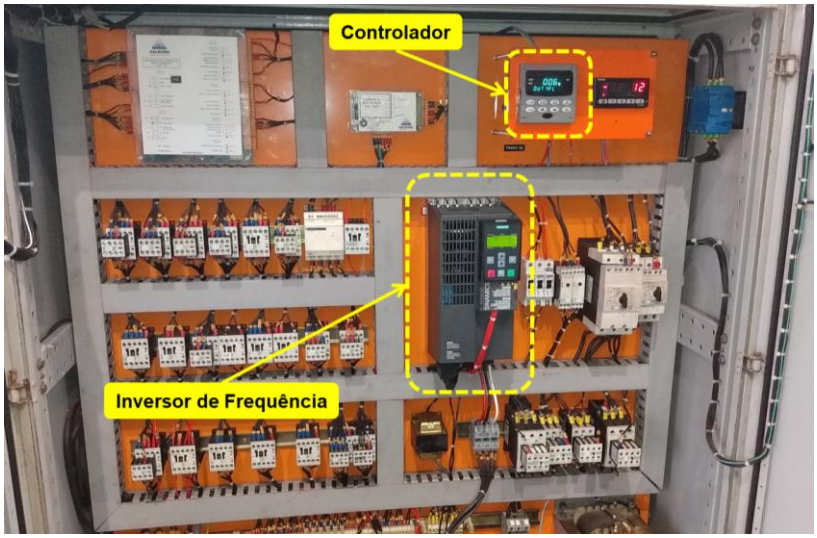
DADOS DO INVERSOR	
FABRICANTE	SIEMENS
MODELO	SINAMICS G120C
REFERÊNCIA	6SL3210-1KE23-8UP1
POTÊNCIA MÁXIMA	18,5 kW
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	380 a 480 V
SINAL DE COMANDO	4 a 20 mA

DADOS DO MOTOR	
TIPO	INDUÇÃO DE GAIOLA TRIFÁSICO
POTÊNCIA	18,5 kW (25 CV)
VELOCIDADE	3525 rpm
TENSÃO NOMINAL	440 V
CORRENTE NOMINAL	30,8 A
FATOR DE POTÊNCIA (COS ϕ)	0,88

FONTE: SIEMENS (2019)

Foram realizadas as alterações no painel de comando da caldeira para implantar o controle automatizado. A FIGURA 4 mostra como ficou a instalação final do controlador e do inversor de frequência, responsáveis agora pelo controle do sistema de combustão da caldeira. No APÊNDICE A pode ser observado o esquema elétrico do novo sistema de controle de combustão.

FIGURA 4 – PAINEL ELÉTRICO DE ACIONAMENTO DA CALDEIRA



FONTE: OS AUTORES (2019)

4. ANÁLISESE RESULTADOS

Esta seção trará os resultados obtidos após a implantação do controle automatizado no sistema de combustão da caldeira objeto de estudo deste trabalho.

Foi estabelecida uma linha de corte para a seleção dos dados para a realização das análises. Foram selecionados os dados da caldeira somente dos dias em que a produção da linha, que utiliza o vapor como insumo, foi superior a 1.200 toneladas de bobinas de aço. A planilha que apresenta a compilação desses dados é apresentada na TABELA 4.

TABELA 4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Período		Média da Pressão (kgf/cm²)		Desvio Padrão Pressão (kgf/cm²)		Média da Vazão de Gás (Nm3/h)		Consumo de Gás Natural (m³)		Produção da Linha (t)		Consumo Específico (m³/t)	
Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
01/05/2019	01/10/2019	5,54	5,47	0,372	0,128	204,63	172,78	4.909,41	4.146,75	1.496,85	1.254,04	3,280	3,307
02/05/2019	02/10/2019	5,40	5,47	0,602	0,110	211,35	177,14	5.065,99	4.267,64	1.477,13	1.604,53	3,430	2,660
03/05/2019	03/10/2019	5,52	5,47	0,292	0,102	201,16	177,57	4.827,18	4.261,43	1.529,51	1.439,39	3,156	2,961
04/05/2019	04/10/2019	5,45	5,45	0,582	0,129	194,98	196,26	4.679,95	4.710,27	1.491,08	1.982,94	3,139	2,375
05/05/2019	05/10/2019	5,45	5,47	0,516	0,120	210,63	182,70	5.054,55	4.384,81	1.830,36	1.623,44	2,762	2,701
11/05/2019	06/10/2019	5,24	5,46	1,210	0,123	183,70	179,37	4.409,01	4.304,83	1.322,57	1.287,70	3,334	3,343
12/05/2019	07/10/2019	4,94	5,45	1,350	0,145	294,10	187,85	4.721,11	4.508,38	1.549,56	1.544,90	3,047	2,918
18/05/2019	08/10/2019	5,30	5,45	0,821	0,149	202,24	194,00	4.853,71	4.656,42	1.432,64	1.800,53	3,388	2,586
19/05/2019	09/10/2019	5,52	5,47	0,285	0,102	203,08	178,00	4.874,41	4.272,60	1.565,38	1.337,03	3,114	3,196
26/05/2019	10/10/2019	5,47	5,46	0,439	0,130	206,65	185,11	4.960,10	4.443,08	1.425,81	1.560,42	3,479	2,847
29/05/2019	18/10/2019	5,40	5,52	0,282	0,220	211,63	152,53	5.078,51	3.660,59	1.534,90	1.220,75	3,309	2,999
Médias		5,38	5,47	0,614	0,133	211,29	180,30	4.857,63	4.328,80	1.514,16	1.514,15	3,221	2,899
Totais		-	-	-	-	-	-	53.433,93	47.616,80	16.655,76	16.655,65	3,208	2,859

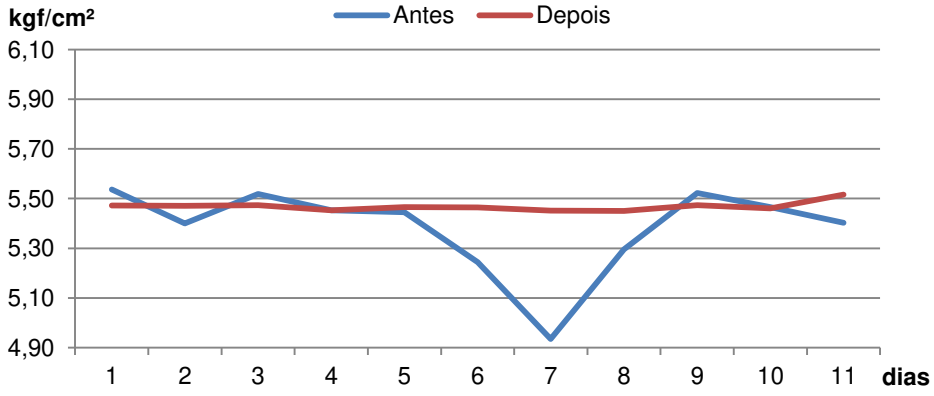
FONTE: OS AUTORES (2019)

4.1 PRESSÃO DO VAPOR PRODUZIDO PELA CALDEIRA

A FIGURA 5 apresenta o gráfico de comparação da pressão da caldeira nestes dois períodos. Observa-se que a pressão da caldeira teve uma menor oscilação, em torno do valor de *set-point* de 5,5 kgf/cm², com a operação do sistema de controle automatizado. A média do período amostrado destes valores foi:

a) pressão: 5,38 kgf/cm² (antes) e 5,47 kgf/cm² (depois);
b) desvio padrão: 0,614 kgf/cm² (antes) e 0,133 kgf/cm² (depois).

FIGURA 5 – COMPARATIVO DA PRESSÃO DO VAPOR PRODUZIDO

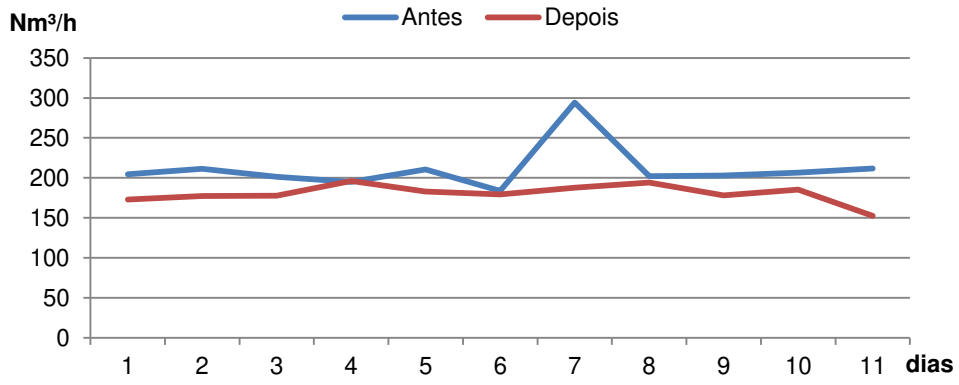


FONTE: OS AUTORES (2019)

4.2 VAZÃO DE GÁS NATURAL CONSUMIDO PELA CALDEIRA

Ao analisar o comportamento da vazão média de gás natural consumido pela caldeira pode-se perceber uma redução de aproximadamente 15% comparando-se o período anterior da implantação do controle automatizado. Na FIGURA 6 pode-se verificar o gráfico comparativo da média da vazão de gás nos dois períodos.

FIGURA 6 – COMPARATIVO DA VAZÃO DE GÁS CONSUMIDO



FONTE: OS AUTORES (2019)

4.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE GÁS NATURAL

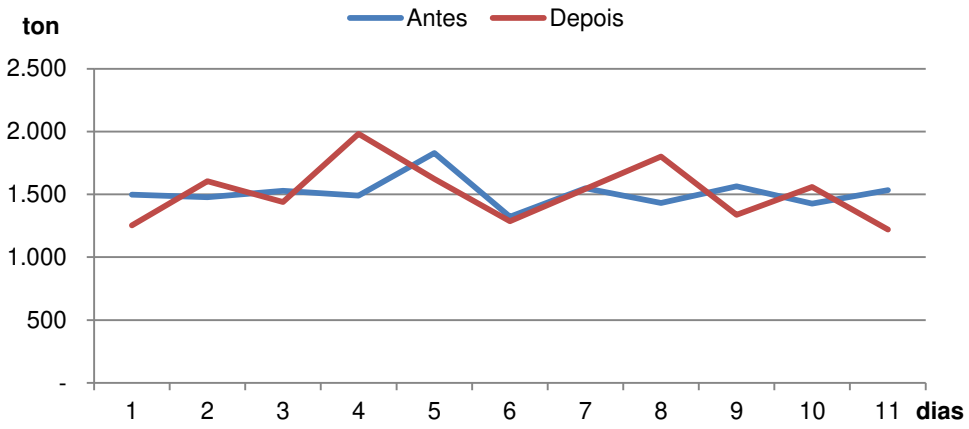
Como a caldeira produz vapor como insumo a ser utilizado por outro processo produtivo o mesmo impacta para compor o custo operacional da linha de produção. Sendo assim é possível calcula o consumo específico de gás natural utilizado na produção de vapor. Isso é feito através da relação entre o total de gás natural utilizado na caldeira e o total de bobinas de aço produzidas pela linha de produção. A EQUAÇÃO 2 demonstra como é feito esse cálculo.

$$\text{Consumo Específico} = \frac{\text{Consumo Total de Gás Natural}(m^3)}{\text{Produção Total de Aço (t)}} \qquad (2)$$

Com base nessa informação pode-se calcular o consumo específico de gás natural da caldeira comparando os períodos anterior e posterior à implantação do controle automatizado.

Na FIGURA 7 é apresentado o gráfico com a produção diária de aço durante o período selecionado para a verificação. Nos períodos anterior e posterior à implantação a linha produziu respectivamente 16.655,76 e 16.655,65 toneladas de aço, sendo a análise feita sob as mesmas condições de demanda de vapor exigida para essa produção.

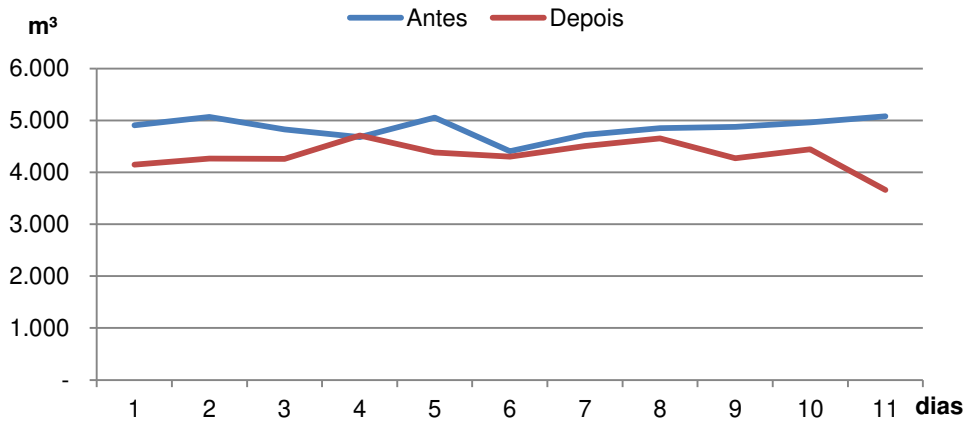
FIGURA 7 – GRÁFICO DE PRODUÇÃO DIÁRIA DE AÇO



FONTE: OS AUTORES (2019)

Na FIGURA 8 pode-se verificar o gráfico do total de gás natural consumido na caldeira em cada dia da produção verificada anteriormente. É possível notar que o consumo de gás, comparando-se os períodos anterior e posterior à implantação, teve uma redução em praticamente todos os dias. Totalizando o consumo de gás nos dois períodos tem-se 53.433,93 m³ anteriormente e 47.616,80 m³ posteriormente à implantação do sistema de controle, o que representa uma redução de 10,89% no consumo de gás.

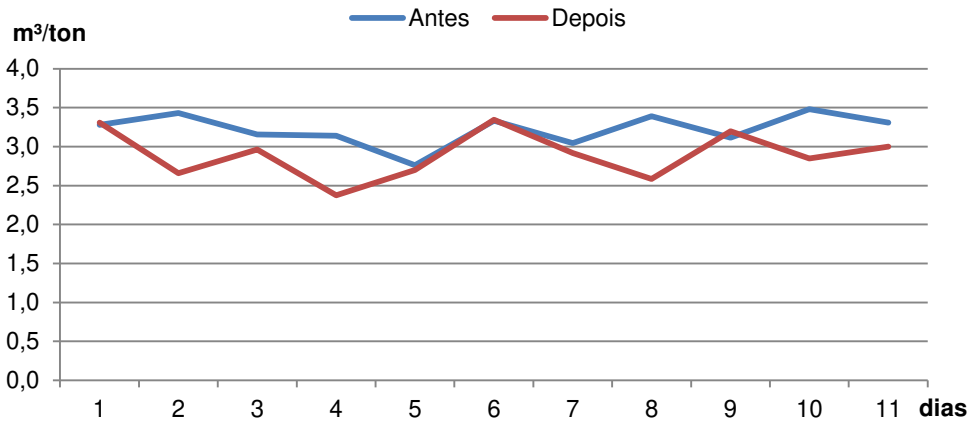
FIGURA 8 – GRÁFICO DO CONSUMO DIÁRIO DE GÁS NATURAL



FONTE: OS AUTORES (2019)

Com os dados de consumo de gás natural e a produção de aço de cada dia dos períodos citados pode-se, através da EQUAÇÃO 2, calcular o consumo específico de combustível. A FIGURA 9 apresenta o gráfico com o consumo específico de gás natural para a produção de cada dia do período da avaliação.

FIGURA 9 – GRÁFICO DO CONSUMO ESPECÍFICO DIÁRIO DE GÁS NATURAL



FONTE: OS AUTORES (2019)

Pode-se observar que o consumo específico de gás natural passou a ser menor no período posterior à implantação do controle automatizado do sistema de combustão da caldeira. No período da análise pode-se verificar que foram utilizados em média 2,899m³ de gás natural para produzir cada tonelada de aço.

A TABELA 5 mostra a comparação do consumo específico de gás natural utilizado para produzir o vapor utilizado na linha de produção.

TABELA 5 – COMPARATIVO DO CONSUMO ESPECÍFICO

	Antes	Depois
Total de Gás Natural Consumido (m³)	53.433,93	47.616,80
Total de bobinas de aço produzidas (ton)	16.665,76	16.665,65
Consumo Específico (m³/ton)	3,208	2,859

FONTE: OS AUTORES (2019)

Com a análise dos resultados pode-se determinar que houve uma redução de 10,87% no consumo de gás natural da caldeira necessários para cada tonelada de bobina de aço produzida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a implantação de um controle automatizado no sistema de controle de combustão de uma caldeira industrial com capacidade para a produção de 6.500 kg/h de vapor. Após o estudo de todos os sistemas que fazem parte da caldeira foi verificada a possibilidade de fazer alterações no tipo de controle empregado para a regulagem da combustão.

Uma das etapas fundamentais na execução deste trabalho foi a fase de modelagem matemática do sistema e as simulações computacionais. Ambas contribuíram para que não houvesse riscos de segurança para equipamentos e

principalmente pessoas. O projeto se deu sem comprometer a construção original do equipamento e não houve alterações que impactassem o funcionamento original da caldeira.

As alterações realizadas nos componentes de modulação da combustão da caldeira impactaram positivamente para se conseguir uma redução significativa no consumo de gás natural da caldeira. Com base no exposto estudo, conclui-se que a implantação de um controle automatizado do sistema de combustão de uma caldeira pode aumentar sua eficiência energética e consequentemente contribuir para a redução do custo operacional de uma linha de produção que utiliza o vapor como insumo em seus processos.

6. REFÊRENCIAS

AALBORG. **Manual de Instruções**: Caldeira Flamotubular Mission™ 3-Pass. Rio de Janeiro: Aalborg Industries, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12313**: Sistema de combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. Rio de Janeiro, 2000.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

BRASIL, Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora Nº 13** - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. Brasília: Ministério do Trabalho, 1995.

COTANET, Industrial. **Plano de Manutenção Preventiva de Caldeiras**. Disponível em: <http://industrial.cotanet.com.br/img/site/produtos/plano-de-manutencao-preventiva-de-caldeiras.jpg>. Acesso em: 28 maio. 2019.

DUNN, William C. **Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processo**. 1.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FERRARI, A. C. K. ; LEANDRO, G. V. ; COELHO, L. S. ; SILVA, C. A. G. ; OSINSKI, C. ; PELACINI, D. A. F. . **Algoritmo de Pastoreio do Elefante Aplicado na Identificação de um Sistema Multivariável**. São Paulo: 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON, 2018. v. 13.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

HONEYWELL. **UDC2500 DIN Controller**. Disponível em: https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/instrumentation/panel-mounted-controllers-and-programmers/1-4th-din-controllers/Pages/udc2500.aspx. Acesso em: 12 outubro. 2019.

SIEMENS. **SINAMICS G120C DP 18,5KW UNFIL.** Disponível em: https://support.industry.siemens.com/cs/pd/426967?pdti=pi&dl=pt&lc=pt-BR. Acesso em: 15 outubro.