

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

HENRIQUE BETTONI KAWÁS

**MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE
CALDEIRAS DE PROJETOS DISTINTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2014

HENRIQUE BETTONI KAWÁS

MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE CALDEIRAS DE PROJETOS DISTINTOS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão II, do Curso Superior de Engenharia Ambiental do Departamento Acadêmico de Ambiental – DAAMB – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Maricir Cristina Parreira de Souza.

CAMPO MOURÃO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Ambiental - DAAMB
Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE CALDEIRAS DE PROJETOS DESTINTOS

por

HENRIQUE BETTONI KAWÁS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof^a. Dra. Maricir Cristina Parreira de Souza

Prof^a. Dr. Flávia Vieira da Silva Medeiros

Prof. Dr. Rafael Montanhini Soares de Oliveira

O Termo de Aprovação assinado consta no Departamento Acadêmico de Ambiental do campus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me apoiar nas horas mais difíceis, e por estar comigo neste momento tão importante em minha vida.

Agradeço imensamente aos meus pais Ana Maria Bettoni Kawás e Jamil Kawás Neto e minha irmã Heloisa Bettoni Kawás, por sempre me apoiar em minhas decisões, pelos puxões de orelhas nas horas certas, e por sempre estarem perto de mim. Em qualquer hora e em qualquer lugar, sempre estiveram do meu lado para o que eu precisasse.

Agradeço também ao meu avô Amim Kawás, que infelizmente nos deixou durante minha graduação, momento muito triste em minha vida, mas sei que neste momento está tão feliz quanto eu.

Agradeço a minha companheira Nayara Romano, por todos os momentos juntos durante a graduação, pelo apoio, risadas, estudos, sempre me motivando a ser uma pessoa melhor, e sempre acreditando no meu potencial.

Agradeço ao Professor Thiago Morais de Castro e Professora Maricir Cristina Parreira de Souza, pela orientação neste trabalho, e por todo esforço que fizeram para que este trabalho viesse a ser concluído. Agradeço também a todos os professores do Departamento Acadêmico de Ambiental, por todo aprendizado durante a graduação, com certeza, levarei esses ensinamentos por toda minha vida.

E por fim, agradeço aos meus companheiros da República Pelé Marreta, Dani, Bruno, Tom, Fejão, Guilherme, Edinho e Renan, e ao meu fiel amigo Pelé Marreta, nunca, nenhum outro cachorro tomará seu lugar em meu coração, você é o cara. Levarei vocês sempre em meu coração. Agradeço também aos meus amigos do Six Team, Niverjada, Babikers, TSOP, do futebol, da faculdade, os amigos de Cianorte, que sempre me apoiaram e me incentivaram, e principalmente, acreditaram em mim. Guardarei para sempre todos os momentos importantes junto com vocês.

RESUMO

KAWÁS, Henrique B. **Monitoramento das emissões atmosféricas de caldeiras de projetos distintos**. 2014 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) —Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

O objetivo deste trabalho foi monitorar as emissões de caldeiras de projetos distintos em duas lavanderias industriais, situadas no município de Cianorte, Estado do Paraná, analisando a eficiência da combustão e comparando os padrões de lançamento definidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14. O desenvolvimento consistiu em coletar os dados por meio do monitoramento utilizando um analisador de gases durante quatro amostragens, sendo realizado um monitoramento a cada mês, comparando os resultados com a legislação vigente expondo-os em gráficos e tabelas de forma a obter informações técnicas sobre as caldeiras monitoradas, concentrações de monóxido de carbono (CO), de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de dióxido de enxofre (SO₂). Além disso, foi realizado o monitoramento da densidade aparente da fumaça com auxílio da Escala de Ringelmann e por fim obter a eficiência da combustão. Durante o monitoramento foram encontradas algumas dificuldades como a qualidade dos combustíveis (lenha) utilizados nas caldeiras, que possivelmente não possuíam um teor de umidade adequado para o monitoramento, resultando em alguns momentos altas concentrações de CO. Os resultados obtidos mostram que tanto a caldeira convencional quanto a caldeira automatizada, apresentaram maior concentrações de monóxido de carbono no dia 24 de abril, resultando em 2.346 mg.Nm⁻³ e 939 mg.Nm⁻³, respectivamente. A média da eficiência da combustão da caldeira convencional foi de 57,5%, sendo inferior a eficiência da combustão da caldeira automatizada, que teve uma eficiência média de 72%.

Palavra-chave: gases de combustão, caldeira convencional, caldeira automatizada, eficiência da combustão.

ABSTRACT

KAWÁS, Henrique. B. **MONITORING OF ATMOSPHERIC EMISSIONS IN DIFFERENT DESIGN BOILERS**. 2014 43 f. Labor Course Completion (Bachelor of Environmental Engineering) — Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2014.

The aim of this study was to monitor emissions from different projects boilers installed in two industrial laundries, located in Cianorte county, State of Parana, analyzing combustion efficiency of conventional and automated boilers, comparing the discharge standards set by Resolution SEMA-PR No. 016/14. The research development consisted in collecting data by monitoring, using a gas analyzer Telegan brand, Tempest 100 Model for four samples, being performed a monthly monitoring, comparing the results with current legislation, and exposing them in charts and tables to obtain technical information about the monitored boilers, such as concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx) and sulfur dioxide (SO₂). Besides, it was performed the apparent smoke density monitoring, with the use of Ringelmann Scale, as well the efficiency of combustion. During the task some difficulties were found, such as the quality of the fuel (wood) used in boilers, which possibly did not have a moisture content suitable for monitoring, resulting, sometimes, CO high concentrations. The final results show that both, the conventional boiler and the automated boiler, presented higher concentrations of carbon monoxide on April 24, resulting in 2.346 mg.Nm⁻³ and 939 mg.Nm⁻³, respectively. The average of combustion efficiency in conventional boiler was 57.5%, being inferior than combustion efficiency of the automated boiler, which had an average of 72%.

Keyword: combustion gases, conventional boiler, automated boiler, combustion efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Processos realizados em lavanderias industriais e suas finalidades básicas.....	12
Tabela 2 — Padrões de emissões atmosféricas exigidos utilizando derivados de madeira como combustível.....	14
Tabela 3 — Distribuição de datas e horários dos monitoramentos das caldeiras.	21
Tabela 4 — Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Convencional.....	22
Tabela 5 — Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Automatizada.....	25
Tabela 6 — Média das perdas de eficiências da combustão das caldeiras	28
Tabela 7 — Média das eficiências das caldeiras.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Fluxograma do processo produtivo das lavanderias industriais	13
Figura 2 — Localização das lavanderias industriais onde serão monitoradas as caldeiras.....	15
Figura 3 — Aparelho eletrônico marca Telegan Gás Monitoring, modelo Tempest 100	16
Figura 4 — Escala de Ringelmann utilizada para visualizar a densidade aparente da fumaça	17
Figura 5 — Layout da caldeira convencional	19
Figura 6 — Layout da caldeira automatizada.....	20
Figura 7 — Gráfico comparativo com as concentrações de CO na caldeira convencional	24
Figura 8 — Gráfico comparativo com as concentrações de CO na caldeira automatizada.....	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3 REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 QUALIDADE DO AR E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	6
3.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E EFEITOS DA POLUIÇÃO	7
3.3 CALDEIRAS	8
3.3.1 Tipos de caldeiras e de combustíveis	9
3.3.2 Processo de combustão da lenha	10
3.3.3 Uso do vapor d'água em lavanderias industriais	12
3.4 RESOLUÇÃO SEMA-PR 016/14.....	13
4 MATERIAL E MÉTODOS	15
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5.1 INFORMAÇÕES TÉCNICAS DAS CALDEIRAS	19
5.2 MONITORAMENTO DAS EMISSÕES	21
5.2.1 Monitoramento da caldeira convencional	21
5.2.2 Monitoramento da caldeira automatizada.....	25
5.3 EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO	28
6 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32
APÊNDICE A — Extrato das medições da caldeira automatizada	36
APÊNDICE B — Extrato das medições da caldeira convencional	37
APÊNDICE C — Planilha das medições	38

1 INTRODUÇÃO

Durante a Revolução Industrial, o vapor d'água tinha basicamente a finalidade de mover máquinas e turbinas. Porém, com o avanço das indústrias, foi necessária a sua utilização em diversas áreas, e atualmente o vapor d'água é utilizado em empresas alimentícias, lavanderias industriais, usinas de açúcar e álcool, fábricas de papel e celulose, frigoríficos, abatedouros de aves, laticínios entre outros (ALTAFINI, 2002).

Nas indústrias o equipamento bastante comum utilizado para geração de vapor d'água é a caldeira, que trabalhando com pressão superior a pressão atmosférica, produz vapor a partir da energia térmica liberada pela combustão de uma fonte qualquer. A caldeira é composta por uma câmara de combustão (fornalha) e um trocador de calor, além de diversos equipamentos integrados, permitindo assim, a obtenção do maior rendimento possível e maior segurança (TORREIRA, 1995).

Segundo Caetano e Duarte Junior (2004) a combustão é uma reação química na qual, na presença de oxigênio, ocorre, simultaneamente, uma intensa liberação de energia em forma de calor e luz, resultando, em especial, no desprendimento de calor, denominam-se fumos os produtos resultantes da combustão.

A característica mais importante dos combustíveis é o poder calorífico, que é a quantidade de energia desprendida na combustão completa de uma unidade de massa ou volume, à pressão constante (CAETANO; DUARTE JUNIOR, 2004).

Um dos combustíveis mais utilizados nas caldeiras é a biomassa constituída de madeiras em geral. A lenha apresenta em sua composição elementar carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e quantidade variável de água (CAETANO; DUARTE JUNIOR, 2004). Durante o processo de combustão da lenha, existe uma grande produção de material volátil, tornando-o vantajoso em relação aos demais combustíveis. Porém, na combustão da madeira há geração de gases poluidores para a atmosfera, e estes podem aumentar o efeito estufa, pois possuem a capacidade de absorver parte da radiação infravermelha emitida pela Terra.

Nos dias atuais, há uma grande preocupação com as indústrias que são consideradas potencialmente poluidoras. Essas atividades estão crescendo a cada

dia e podem resultar em sérios problemas ao meio ambiente e aos seres humanos quando são desenvolvidas de maneira ilegal e inadequada.

Segundo Nascimento et al. (2006), estudos comprovam que a poluição atmosférica aumenta o risco de morte e doenças em crianças, na gravidez, e em idosos. Isto se dá principalmente pela emissão de dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃) e material particulado.

Devido aos impactos ambientais causados pela poluição do ar por indústrias significativamente poluidoras no Paraná, foi aprovada, dentre outros requisitos legais, a Resolução SEMA nº 016 de 26 de março de 2014, com a finalidade de estabelecer padrões de controle da poluição atmosférica no estado.

Esta pesquisa visou monitorar poluentes atmosféricos de duas caldeiras instaladas em lavanderias industriais que utilizam lenha como combustível. As caldeiras possuem projetos de fabricação distintos e serão analisadas as emissões atmosféricas comparando-as com as exigências previstas na Resolução SEMA-PR nº 016/14.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar as emissões atmosféricas emitidas por duas caldeiras a lenha de lavanderias industriais, comparando com os padrões de lançamento definidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter informações técnicas de projeto das caldeiras de modelo misto (flamotubular/aquatubular) em duas lavanderias industriais, no município de Cianorte, Estado do Paraná.
- Monitorar as concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) e analisar a densidade aparente da fumaça emitida pelas chaminés das caldeiras com o auxílio da Escala de Ringelmann exigido pela Resolução SEMA-PR nº 016/14.
- Avaliar os resultados obtidos, verificando as eficiências de combustão das caldeiras.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 QUALIDADE DO AR E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera da Terra é comumente dividida em troposfera, estratosfera, mesosfera e exosfera. Destas camadas, a troposfera é a que se encontra mais próxima à superfície e estende-se até alturas que variam de 8 km nos pólos até 17 km próximo a linha do Equador. A região de transição entre a troposfera e a estratosfera chama-se tropopausa, e atua como uma fronteira aproximadamente rígida para o ar troposférico. É na troposfera que ocorrem praticamente todos os processos relacionadas com os fenômenos meteorológicos e as mudanças do tempo (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

Nas ações antrópicas e industriais pode haver uso da atmosfera para descartar grande quantidade de resíduos ou contaminantes. Se esses contaminantes tiverem efeitos adversos, tais como a diminuição da saúde coletiva, redução da visibilidade, danos às plantas e materiais, esses resíduos são chamados de poluentes (GALVÃO FILHO, 1989).

De acordo com a Lei 6.938/81, Artigo 3º, inciso III, o termo “poluição” significa a degradação da qualidade do ar resultante de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, ou criem condições adversas às atividades sociais e econômicas, ou afetem desfavoravelmente a biota, ou afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente, ou emitam matéria ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, 1981).

São muitas as fontes de poluição do ar podendo ser de origem natural, como as emissões vulcânicas, os incêndios florestais, os aerossóis dos oceanos, etc., ou de origem antropogênica, que resultam das inúmeras atividades humanas (PIRES, 2005). Além disso, esta poluição pode ser de fontes móveis ou fixas (estacionárias).

As fontes fixas podem ser subdivididas em dois grupos: um abrangendo atividades pouco representativas nas áreas urbanas, como queimadas, lavanderias e queima de combustíveis em padaria, hotéis e outras atividades consideradas não industriais; e outro grupo formado por atividades individualmente significativas, em

vista à variedade ou intensidade de poluentes emitidos, como a poluição dos processos industriais (PIRES, 2005).

Já a fonte móvel refere-se a qualquer instalação, equipamento ou processo natural ou artificial em movimento, que libere ou emita matéria ou energia para a atmosfera (PARANÁ, 2006).

3.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E EFEITOS DA POLUIÇÃO

De acordo com a Resolução CONAMA nº 003 de 28 de junho de 1990, art.1º, parágrafo único, entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (BRASIL, 1990).

De acordo com Pires (2005) os poluentes atmosféricos podem ser classificados como sólidos, líquidos e/ou gasosos, de acordo com seu estado de agregação. Na prática estes três grupos podem ser combinados de acordo com alguns pontos de vista. Substâncias sólidas ou líquidas podem ser agrupadas como particulado ou material particulado desde que princípios físicos sejam frequentemente utilizados para sua remoção e suas densidades sejam aproximadamente três vezes maiores do que a do ar onde estão diluídos.

Os principais poluentes atmosféricos são os gases tóxicos lançados pelas indústrias e pelos veículos movidos a derivados de petróleo e, os compostos tóxicos formados no ar a partir de elementos componentes dos gases desprendidos pelos motores e chaminés que reagem, com o auxílio da luz, com os elementos da atmosfera (DEL PINO; KRÜGER; FERREIRA, 1996).

De acordo com Pires (2005) dentre os principais poluentes estão o ozônio (O_3), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de

enxofre (SO_2), o material particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 micrômetros (PM_{10}), o material particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 micrômetros ($\text{PM}_{2,5}$).

A poluição atmosférica causa vários efeitos prejudiciais, diretos ou indiretos, sobre a saúde e o bem-estar humanos, sobre os animais e a vegetação, sobre os materiais e as construções e sobre a atmosfera, solos e os corpos d'água. O grau e a extensão destes efeitos dependem da escala de poluição, podendo ocorrer em nível local, regional e global (PIRES, 2005).

De maneira geral, os efeitos podem ser classificados como: agudos, de caráter temporário e reversível, em função do aumento da concentração de poluentes como, por exemplo, a irritação nos olhos e tosse; e crônicos, de caráter permanente e cumulativos com manifestações a longo prazo, podendo causar à saúde humana intoxicações gradativas provocando graves doenças respiratórias além de corrosão de estruturas e a degradação de materiais de construções e obras de arte (CAVALCANTI, 2003).

3.3 CALDEIRAS

A primeira tentativa do homem em produzir vapor na evolução da história da humanidade foi no século II a.C., quando Heron de Alexandria concebeu um aparelho que vaporizava água e movimentava uma esfera em torno do seu eixo. Esse foi o aparelho precursor das caldeiras e das turbinas à vapor (ALTAFINI, 2002).

Caldeira é o nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, cuja aplicação tem sido ampla no meio industrial e também na geração de energia elétrica nas chamadas centrais termelétricas. Esse equipamento, por operar acima da pressão atmosférica, constitui um risco eminente na sua operação (ALTAFINI, 2002).

3.3.1 Tipos de caldeiras e de combustíveis

Existem vários tipos de caldeiras, as quais podem ser classificadas segundo diversos critérios. Segundo uma classificação mais genérica, as caldeiras se classificam em flamotubulares e aquatubulares e mistas (ALTAFINI, 2002).

Nas caldeiras flamotubulares os gases quentes passam por dentro de tubos, ao redor dos quais está a água a ser aquecida e evaporada. Os tubos são montados à maneira dos feixes de permutadores de calor, com um ou mais passos dos gases quentes através do mesmo. As caldeiras flamotubulares são empregadas apenas para pequenas capacidades e quando se quer apenas vapor saturado de baixa pressão (LEITE; MILITÃO, 2008).

As caldeiras aquatubulares são as mais empregadas e como o próprio nome indica, tem circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes envolvendo-os. São usadas para instalações de maior porte e na obtenção de vapor superaquecido (LEITE; MILITÃO, 2008).

A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras pequenas fez surgir as caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos usando grelhas de diversos tipos e possibilitando o volume de câmara necessários aos combustíveis sólidos, como lenha em toras, cavacos, etc. (ANDRADE, 2013).

Existem três tipos de combustíveis diferentes: os sólidos, os líquidos e os gasosos, em diferentes formas comerciais (DADAM et al., 2006).

Os combustíveis sólidos são formados de C, H₂, O₂, S, H₂O e cinzas, sendo combustíveis somente o C, O₂, H₂ e S (ARRUDA, 2009). Os mais utilizados são os derivados da madeira, que de acordo com a Resolução SEMA-PR nº 016/14, são definidos como a lenha, cavacos, serragem, pó de lixamento, casca, aglomerado, compensado e outros que não receberam tratamento com produtos halogenados ou revestidos.

Os combustíveis líquidos podem ser minerais ou não minerais. Os minerais são obtidos pela refinação do petróleo, destilação do xisto betuminoso ou hidrogenação do carvão. Dentre eles estão a gasolina, o óleo diesel e o óleo combustível. Estes combustíveis são formados de hidrocarbonetos (SERFATY,

2007). Os combustíveis líquidos não minerais são os alcoóis e os óleos vegetais. Entre os alcoóis, temos o álcool metílico e o etílico, enquanto que os óleos vegetais são formados de C, H₂, O₂ e N₂ (CEFET-MG, 2009).

O gás natural (GN) é um exemplo de combustível fóssil encontrado em rochas porosas no subsolo. Este combustível gasoso possui aplicações domésticas, industriais e automotivas, sendo composto por gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, predominando o metano (ARRUDA, 2009). A combustão do gás natural é limpa, isenta de fuligem e outros materiais que prejudicam o meio ambiente. Geralmente apresenta baixos teores de contaminantes como o nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre (PETROBRÁS, 2009). Caracteriza-se principalmente por sua eficiência, limpeza e versatilidade. Contribui para reduzir o desmatamento e diminuir o tráfego de caminhões que transportam óleos combustíveis para as indústrias (PETROBRÁS, 2009).

Outro exemplo de combustível gasoso é o gás liquefeito de petróleo (GLP), mais conhecido popularmente no Brasil como gás de cozinha por sua ampla utilização na cocção. Normalmente comercializado em botijões no estado líquido, torna-se gasoso à pressão atmosférica e temperatura ambiente (PETROBRÁS, 2009).

3.3.2 Processo de combustão da lenha

A qualidade da madeira para energia está relacionada à sua umidade e à sua massa específica. Quanto maior o teor de água na madeira, menor é o seu poder de combustão, resultado do processo de evaporação da água que absorve energia no decorrer da combustão (RIBEIRO; VICARI, 2005).

A combustão da madeira apresenta diversas fases: pré-aquecimento, secagem, pirólise, ignição, queima com chama, extinção da chama e incandescência (CASTRO, 2005).

Primeiramente ocorre o pré-aquecimento do cilindro de madeira até a sua superfície atingir a temperatura de vaporização da água contida na madeira. Forma-se então uma frente de vaporização que se propaga em direção ao centro do cilindro. À medida que o cilindro continua a ser aquecido, a sua superfície atinge

uma temperatura acima da qual forma-se uma frente de reação de decomposição térmica chamada pirólise, com a consequente liberação de voláteis (uma mistura de hidrocarbonetos leves) e alcatrão (hidrocarbonetos pesados). Se a taxa de liberação de voláteis durante a pirólise for grande o suficiente para formar uma mistura combustível acima do seu limite inferior de inflamabilidade, então vai existir uma fase de queima com chama, caso contrário somente ocorrerá a pirólise e, ao fim desta, a incandescência. Após a saída dos voláteis a madeira transforma-se em carvão cuja composição depende da madeira e do fluxo de calor incidente (CASTRO, 2005).

Após ocorrer a combustão, o calor é aproveitado, e então são lançados na atmosfera através da chaminé em equipamentos de geração de energia. A esta movimentação de retirada dos gases para permitir a entrada de nova quantidade de ar e combustível, ocasionada pelas diferenças de pressões, se dá o nome de tiragem. O processo de tiragem pode ser natural, quando ocorre simplesmente através da chaminé, ou pode ser forçada quando se dá a utilização de ventiladores (exaustores) (ALTAFINI, 2002).

Os gases de combustão da lenha são compostos por gás carbônico (CO_2), monóxido de carbono (CO), água (H_2O), cinzas, fuligem, compostos de NO_x . A redução do CO_2 na emissão é desejável em virtude do efeito estufa provocado pelo excesso deste gás na atmosfera. O monóxido de carbono (CO), que apesar de combustível poderia ser requeimado, no entanto como se encontra misturado aos gases a requeima não é possível tecnicamente. Com a queima de hidrogênio, é liberada uma alta carga de calor e resulta em vapor de água (BLASELBAUER, 2010).

O monóxido de carbono é um gás insípido, inodoro e incolor. Logo se conclui que é impossível detectar sua presença em um ambiente sem a utilização de analisadores eletrônicos de gases. Além de elevar o consumo para gerar o calor necessário ao processo, o CO é extremamente tóxico. Ao ser inalado tem o poder de impedir a troca de gases pelo sangue, provocando a intoxicação. A exposição de um indivíduo a uma concentração de 2.000 ppm (partes por milhão) por uma hora provoca desmaio e perda de consciência, se este período for prolongado causará a morte (BLASELBAUER, 2010).

As cinzas são produzidas pela presença de elementos na madeira que são incombustíveis, apresentam características específicas e se apresentam sob a forma de material particulado (MP). Além das cinzas produzidas pela combustão normal, a

combustão incompleta promove condições para a geração de fuligem, em muitas vezes sob a forma de carbono não queimado, apresentando-se sob a forma de material particulado de coloração negra ou acinzentada. Os equipamentos para queima do combustível podem produzir óxidos de nitrogênio que liberados na atmosfera se recombina com outros compostos, produzindo elementos altamente corrosivos, ocorrendo com mais frequência na queima de combustíveis líquidos (BLASELBAUER, 2010).

3.3.3 Uso do vapor d'água em lavanderias industriais

Praticamente todas as indústrias de processo químico têm o vapor d'água como principal fonte de aquecimento em reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros setores industriais, como metalúrgico, metal-mecânico, eletrônica, etc., podem-se utilizar o vapor como fonte de aquecimento de diversos processos (BIZZO, 2003). Convém frisar que a qualidade da água de uma caldeira é condição fundamental de segurança e durabilidade, pois incrustações causadas principalmente por sais de cálcio e magnésio nas paredes internas dos tubos de vaporização atuam como uma camada isolante, o que aumenta o consumo de combustível e provoca o enfraquecimento desses tubos (MOREIRA, 2012).

Na Tabela 1 estão descritos os principais processos realizados por lavanderias industriais e suas respectivas finalidades básicas.

Tabela 1 — Processos realizados em lavanderias industriais e suas finalidades básicas.

Principais processos	Finalidades básicas
Alvejamento	Remover coloração amarelada (natural) do material têxtil
Tingimento	Conferir coloração ao material têxtil
Secagem	Retirar umidade do material, através de energia térmica
Amaciamento	Conferir toque agradável ao material
Desengomagem	Remover a "goma" aplicada ao tecido
Gerador de Vapor (caldeira)	Fornecer vapor para os equipamentos e/ou operações que envolvem transferência de calor.

Fonte: SINDITÊXTIL (2009) (adapatado).

O fluxograma simplificado do processo produtivo (Figura 1) descreve o uso de vapor d'água nas empresas em estudo e têm como primeira etapa a desengomagem, seguida pela destonagem (alvejamento), tingimento, amaciamento, centrifugação, secagem e engomagem.

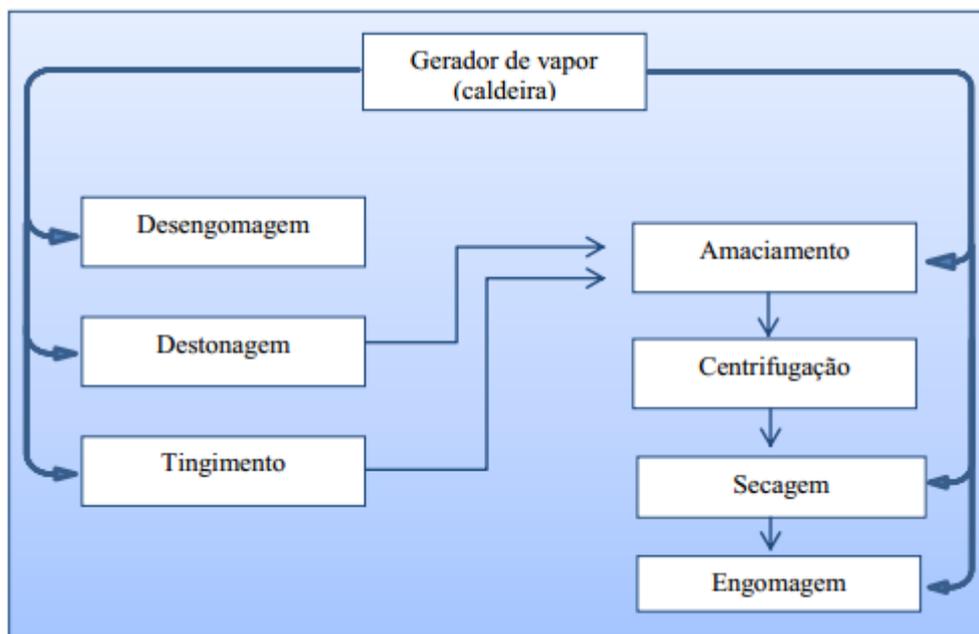


Figura 1 — Fluxograma do processo produtivo das lavanderias industriais

Fonte: SemeAd (Seminário em Administração) 2013.

3.4 RESOLUÇÃO SEMA-PR 016/14

Em seu Artigo 1º a Resolução SEMA-PR nº 016 aprovada em 26 de março de 2014, substitui a Resolução SEMA-PR nº 054/06 e define os critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado de forma ambientalmente segura, pelo estabelecimento de:

- I. padrões de emissão e critérios de atendimento para fontes industriais, comerciais e de serviços;
- II. padrões de condicionamento;
- III. metodologias a serem utilizadas para determinação de emissões.

com vistas a:

- melhoria na qualidade do ar;

- não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas (PARANÁ, 2014).

A Resolução SEMA-PR 016/14 apresenta em seu art. 21, os padrões de emissão atmosférica para processos de geração de calor ou energia. Em seu item IV, estabelece os seguintes padrões de emissão considerando a condição referencial de oxigênio:

a) Condição referencial de Oxigênio fontes de combustão externa:

- para caldeiras e demais casos: 11 %
- Na Tabela 2 são apresentados os padrões de lançamento dos parâmetros atmosféricos e as frequências de amostragem no estado do Paraná, com base na Potência Térmica Nominal¹ para equipamentos de processos de combustão utilizando derivados de madeira como combustível

Tabela 2 — Padrões de emissões atmosféricas exigidos utilizando derivados de madeira como combustível.

Potência Térmica Nominal	Densidade calorimétrica	MP-total	CO	NO _x	SO ₂	Automonitoramento - Amostragem	
(MW)		(mg.Nm ⁻³)	(mg.Nm ⁻³)	(mg.Nm ⁻³)	(mg.Nm ⁻³)	Parâmetros	Frequência
Até 0,5		560	6.000	NA	NA		Anual
Entre 0,5 e 2,0	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann	560	3.000	NA	NA	CO ou MP-Total, O ₂	Anual
Entre 2,0 e 10		560	2.500	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA		Semestral
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA	MP-total, CO,NOx e O ₂	Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

Fonte: Resolução nº 016/14 SEMA-PR.

¹Condição máxima de operação da unidade de geração de calor para o qual o equipamento foi projetado, determinado em termos de potência térmica, com base no Poder Calorífico Inferior - PCI -, calculado a partir da multiplicação do PCI do combustível pela quantidade máxima de combustível queimada por unidade de tempo

Fonte: Resolução nº 016/14 SEMA-PR.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste Trabalho de Conclusão de Curso foram monitoradas as concentrações dos poluentes de duas caldeiras no período de março a junho de 2014, realizada uma medição a cada mês. As duas caldeiras de lavanderias industriais que foram avaliadas situam-se em Cianorte, estado do Paraná, localizadas na rodovia PR-082 que dá acesso ao município de Terra Boa-PR.

A Figura 2 apresenta a localização das lavanderias industriais onde foram monitoradas as caldeiras no Município de Cianorte-PR.

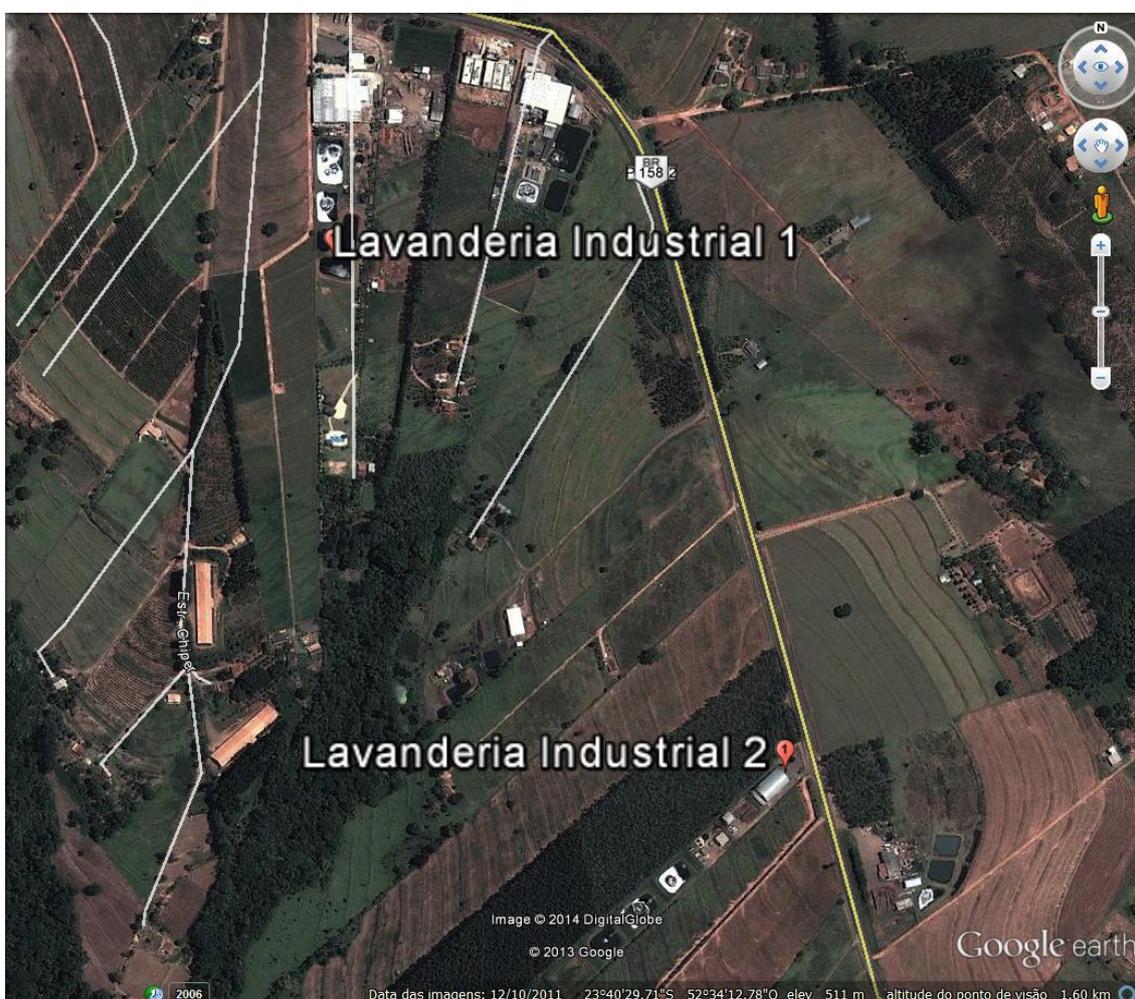


Figura 2 — Localização das lavanderias industriais onde serão monitoradas as caldeiras

Fonte: Google Earth (2011) (Adaptado).

Para o monitoramento dos gases foi utilizado o equipamento da marca Telegan Gás Monitoring, modelo Tempest 100 (Figura 3), que oferece medições

básicas de O_2 (%), CO ($mg.Nm^{-3}$), NO_x ($mg.Nm^{-3}$), SO_2 ($mg.Nm^{-3}$), Pressão atmosférica, Temperatura ($^{\circ}C$) e CO_2 (%), além da eficiência da combustão (%) para uma larga escala de combustíveis, entre outras funções, sendo que já vem acoplada uma impressora ao corpo do analisador. Foram realizadas medições de emissões atmosféricas nestas caldeiras, com doze amostragens em cada coleta de gases, com intervalo de um minuto a cada amostragem.



Figura 3 — Aparelho eletrônico marca Telegan Gás Monitoring, modelo Tempest 100

Fonte: Manual de instruções Tempest 100 (2011).

A medição foi realizada no duto de saída dos gases (chaminé), em um ponto localizado a uma distância de 3 metros após o duto de interligação do exaustor com a chaminé na caldeira automatizada. O ponto de amostragem da medição dos gases da caldeira convencional está situado num trecho reto do duto de interligação da caldeira com o exaustor. O duto possuía uma seção quadrada de dimensões 0,40 m x 0,40 m e um diâmetro equivalente de 0,45 m. O orifício através do qual se realizou a amostragem possuía um diâmetro de 10 mm e estava localizado a uma distância de 1,20 m após a curva do duto de saída dos gases da caldeira.

Os dados técnicos da caldeira convencional (Figura 4) foram disponibilizados pelo engenheiro químico responsável técnico pela lavandeiras industrial. Os dados técnicos da caldeira da caldeira automatizada (Figura 5), foram obtidos através do manual da caldeira, requerido na lavanderia industrial.

Após a obtenção das concentrações dos poluentes, foi feito o cálculo de concentração corrigida para condições referenciais de Oxigênio, que é de 11% conforme a Resolução SEMA-PR nº 016/2014. A Equação 1 representa a fórmula para corrigir a concentração medida para condição referencial de Oxigênio utilizada.

$$C_R = \frac{(21 - O_R)}{(21 - O_M)} \times C_M \quad (1)$$

onde:

C_R = concentração corrigida para condições referenciais em mg.Nm^{-3}

O_R = concentração referencial de Oxigênio em % por volume

O_M = concentração medida de Oxigênio em % por volume

C_M = concentração medida em mg.m^{-3}

A unidade de medida mg.Nm^{-3} refere-se as concentrações corrigidas para as condições normais de temperatura e pressão, correção esta que o aparelho realiza de forma automática. Além do aparelho eletrônico, foi analisada a densidade aparente da fumaça emitida pelas chaminés das caldeiras com o auxílio da Escala de Ringelmann (Figura 4). Este método simplificado mede a qualidade do ar através de uma escala gráfica, utilizando uma avaliação colorimétrica, constituída de cinco padrões com variação uniforme de tonalidade entre o branco e o preto.



Figura 4 — Escala de Ringelmann utilizada para visualizar a densidade aparente da fumaça

Este método foi realizado segurando a escala com o braço totalmente esticado, na direção da chaminé da caldeira, vista através do orifício, verificando-se a tonalidade da fumaça até que se torne uniforme com uma das tonalidades da Escala de Ringelmann. Foi respeitada a distância mínima de 30 metros, e máxima de 150 metros de distância da chaminé conforme exigido pela Escala de Ringelmann.

De acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14, a densidade da fumaça não pode ultrapassar 20%, a qual equivale ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann, exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia. Tal análise foi realizada durante os dias de monitoramento das caldeiras, verificando se a mesma estava em conformidade com a Resolução SEMA-PR 016/14.

Os dados obtidos no monitoramento foram confrontados com os padrões vigentes da Resolução nº 016/14 SEMA-PR, com a geração de tabelas e gráficos de das medições, além disso, foram comparadas as concentrações medidas entre as caldeiras.

A partir dos resultados foram verificadas as eficiências energéticas das caldeiras, os consumos de combustíveis (lenha) e o atendimento da legislação vigente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INFORMAÇÕES TÉCNICAS DAS CALDEIRAS

A caldeira convencional (Figura 5) analisada é da marca CHAMAS, modelo FTH, nº de série 037, com capacidade nominal de 2.000 kg.h^{-1} e potência térmica nominal de 1,92 MW. Como a potência da caldeira é superior a 0,5 MW e inferior a 2 MW, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14, o limite exigido para lançamento de CO é de 3.000 mg.Nm^{-3} . É dotada de um projeto de fornalha simples tipo capela, poucos recursos tecnológicos (projeto comum), ou seja, composto apenas por uma fornalha, trocador de calor, exaustor e chaminé. Não é equipada com pré-aquecedores de ar (recuperador de calor), além de não possuir admissão de ar secundário. Dispõe apenas de dois passes em seu fluxo de gases e automatização simples e parcial de controle operacional (sistema on/off).

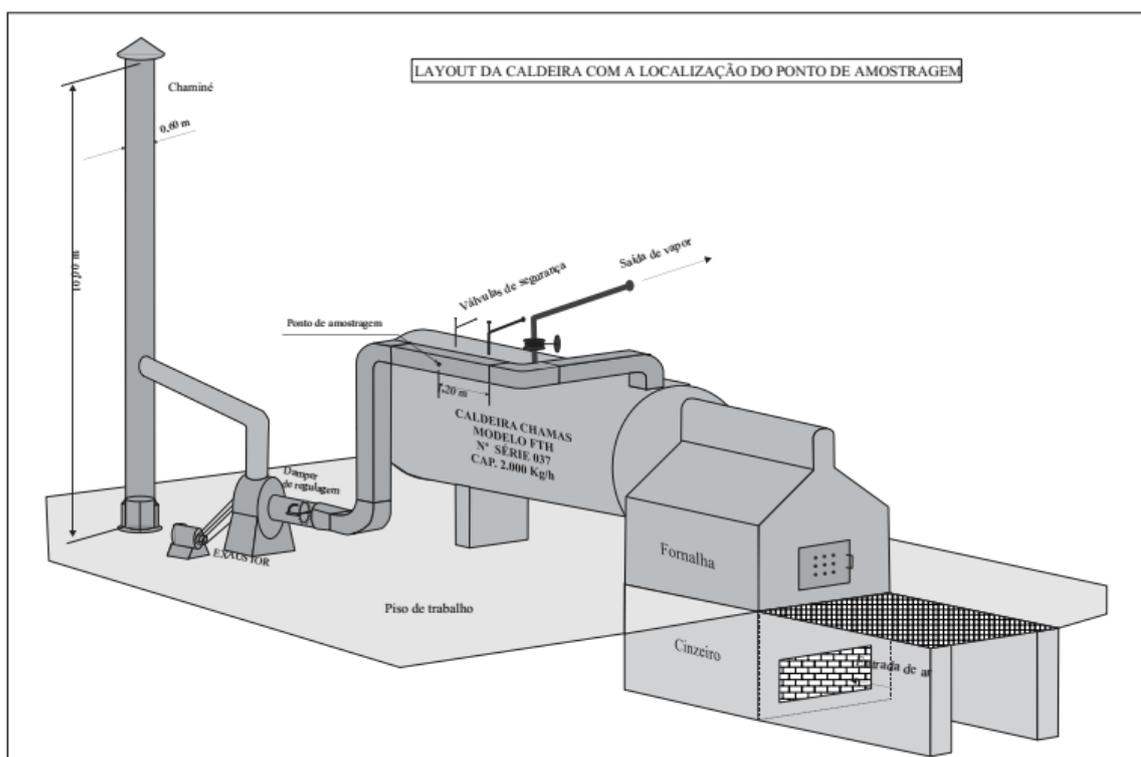


Figura 5 — Layout da caldeira convencional

Fonte: Autoria própria.

A caldeira automatizada (Figura 6) é da marca Biochamm, modelo BGV-3000L, nº de série 2161, fabricada em 2009, com capacidade nominal de 3.000 kg.h⁻¹ e potência térmica nominal de 2,88 MW. Desse modo, por situar-se entre 2 MW e 10 MW, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14, o limite exigido para lançamento de CO é de 2.500 mg.Nm⁻³. Possui um projeto otimizado desenvolvido pelo próprio fabricante (Biochamm Caldeiras), dotada de pré-aquecedores de ar para recuperação de calor dos gases de combustão e de sistema de controle de poluição atmosférica para retenção de material particulado do tipo multiciclone. Além disso, têm admissão de ar secundário pra auxiliar na queima de CO e três passes no fluxo dos gases no interior da caldeira.

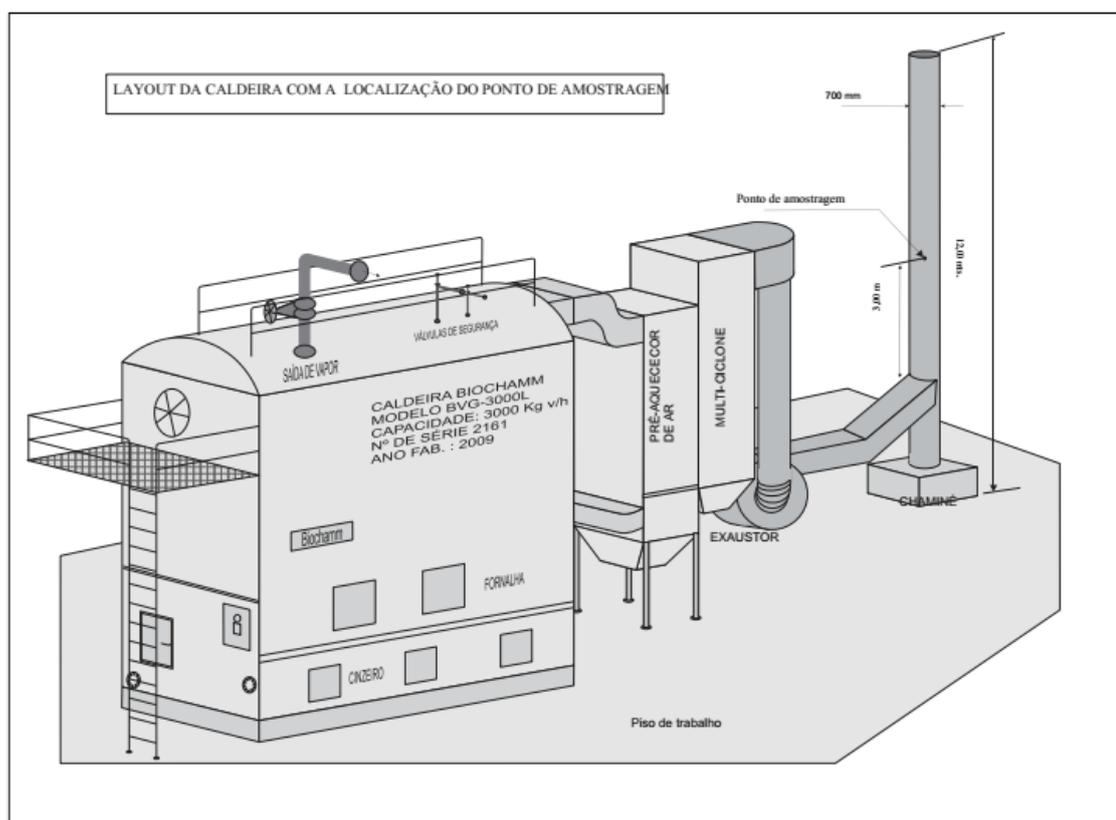


Figura 6 — Layout da caldeira automatizada.

Fonte: Autoria própria.

O projeto da caldeira automatizada possui uma fornalha otimizada e sistema de controle automatizado completo, envolvendo várias malhas de controle

proporcional como admissão de ar, tiragem de gases e controle de pressão de vapor, proporcionando alta eficiência térmica, redução no consumo de combustíveis e menor geração de poluentes.

5.2 MONITORAMENTO DAS EMISSÕES

O monitoramento das caldeiras iniciou-se em 27 de março de 2014 e encerrou em 26 de junho de 2014 (Tabela 3), sendo realizado um monitoramento por mês para cada caldeira. Foram realizadas 12 amostragens em cada medição com intervalos de 1 minuto. Todos os comprovantes do monitoramento emitidos pelo analisador de gases e os respectivos horários estão presentes no Apêndice A. As planilhas com todos os dados e respectivas concentrações corrigidas então presentes no Apêndice B.

Tabela 3 — Distribuição de datas e horários dos monitoramentos das caldeiras.

Data do monitoramento	Caldeira Convencional		Caldeira Automatizada	
	Início	Término	Início	Término
27/03/2014	09:10:04	09:21:04	08:04:04	08:15:05
24/04/2014	09:09:04	09:20:04	07:49:04	08:00:04
22/05/2014	15:47:04	15:58:05	07:36:05	07:47:05
26/06/2014	15:19:05	15:30:04	08:17:05	08:28:04

5.2.1 Monitoramento da caldeira convencional

As médias das concentrações das emissões atmosféricas que foram obtidas na combustão da lenha na caldeira convencional encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 — Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Convencional.

Data do monitoramento	Caldeira Convencional						
	Temperaturas			Resultados com correção (O ₂ Ref. 11%)			
	Ambiente (°C)	Gases (°C)	O ₂ (%v/v)	Fator de correção	NO _x (mg.Nm ⁻³)	SO _x (mg.Nm ⁻³)	CO (mg.Nm ⁻³)
27/03/2014	30	149	16,0	2,0000	44	14	1.120
24/04/2014	30	157	14,7	1,5873	51	144	2.346
22/05/2014	26	158	15,1	1,6949	42	47	832
26/06/2014	26	162	13,9	1,4085	75	185	1.917
Limite					NA	NA	3.000

A partir da Tabela 4, pode-se observar que as temperaturas dos gases possuíram valores elevados e, tal fato, conciliado com a vazão excessiva de tiragem dos gases através do exaustor, resulta na perda de grande quantidade de calor, o qual poderia estar sendo recuperado, caso as instalações fossem dotada de um pré-aquecedor de ar (recuperador de calor).

Observa-se que no dia 27 de março, o fator de correção para oxigênio de referência foi de 2,0, sendo o mais elevado dentre todos os meses, isso ocorreu pelo fato de que a média da porcentagem de oxigênio medida, nesse mês, ter sido alta, isto é, houve aumento na entrada de ar, 16% v/v, ou seja, o volume de oxigênio presente no ar atmosférico (100%), foi de 16%. Isso ocorreu por tratar-se de uma caldeira mais antiga e sem uma vedação adequada para o controle da entrada de ar sob as grelhas da fornalha. Esse aumento de entrada do ar resultou ainda em um maior consumo de combustíveis, pois, gera grande perda de calor nos gases de combustão e reduz a eficiência na geração de vapor.

Os resultados com correção para oxigênio referencial de 11%, como exigido pela Resolução SEMA-PR Nº 016/14, resultaram em altos valores de concentração de CO, entretanto, todos os valores médios para o monóxido de carbono estão em conformidade com a legislação vigente, que determina o valor máximo estabelecido para 3.000 mg.Nm⁻³.

Os parâmetros NO_x e SO_x não se aplicam para o porte do equipamento em questão, segundo a Resolução SEMA-PR Nº 016/14, não sendo definidos valores limites para lançamento na atmosfera, pois ambas as caldeiras possuem potência térmica nominal abaixo de 10 MW. Em termos de comparação, para caldeiras com potência térmica nominal entre 10 e 50 MW, a Resolução SEMA-PR nº 016/14 estabelece o limite máximo para NO_x de 500 mg.Nm⁻³, e todos os valores

monitorados foram inferiores. O parâmetro SO_x não é exigido para caldeiras que utilizam derivados de madeira como combustível.

De acordo com Pinheiro e Valle (1995), os óxidos de nitrogênio (NO_x) são produzidos durante a combustão a partir do nitrogênio do ar (NO_x térmico) ou do nitrogênio do combustível (NO_x combustível), que não é o caso em questão. A temperatura e o teor de O_2 e N_2 nos produtos da combustão são os principais fatores para a formação de NO_x , e são controlados pelo excesso de ar. Assim, além da influência na eficiência da combustão, o percentual de excesso de ar determina os níveis de emissão de NO_x e CO. Pequenos excessos de ar geram altas temperaturas de chama e baixos teores de O_2 e N_2 , enquanto altos valores, o contrário. Nesse caso o excesso de ar pode ter provocado o aumento nas concentrações de NO_x verificadas na caldeira automatizada.

O monitoramento no dia 22 de maio apresentou concentrações com valores menores quando comparado aos outros meses. Tal motivo explica-se, principalmente, pela qualidade do combustível utilizado, com baixa umidade e também que, nesse mês a lavanderia estava realizando uma produção, tal que exigia da caldeira convencional uma produção de vapor próxima a sua capacidade nominal de projeto.

A Figura 7 apresenta o gráfico com as concentrações das quatro amostragens realizadas do parâmetro CO do monitoramento da caldeira convencional, e também o limite máximo de CO permitido, exigido pela Resolução nº 016/14 SEMA-PR.

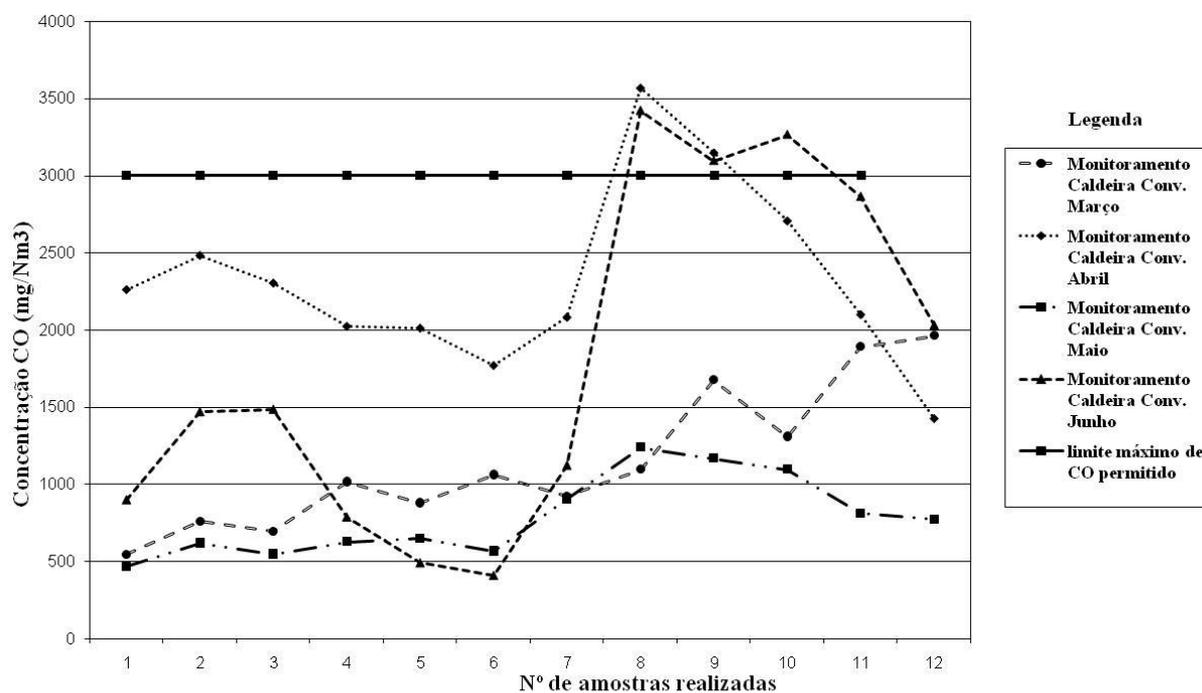


Figura 7 — Gráfico comparativo com as concentrações de CO na caldeira convencional

Durante o monitoramento, foram observadas algumas condições de operação que não favoreceram o desempenho dos processos de combustão analisados. Dentre eles, pode-se citar, o teor de água presente no combustível (lenha), principalmente, no caso, da caldeira com sistema convencional, onde a lenha disponível era recém cortada e apresentava alta umidade. Segundo o proprietário da lavanderia industrial, a disponibilidade atual de lenha seca na região é escassa. Não se pode afirmar com exatidão o valor da umidade presente na lenha utilizada, pois não foram realizadas análises específicas da mesma, porém foi verificado que a lenha utilizada era recém cortada.

Constatou-se também na operação da caldeira convencional uma maior oscilação na taxa de emissão de CO, principalmente, nos períodos de alimentação da caldeira, em função das vazões de ar admitido para combustão e da tiragem dos gases serem mantidos através de regulagem fixa.

Além da utilização do analisador de gases para se obter as concentrações dos poluentes, se fez uso também da Escala de Ringelmann como instrumento

durante os monitoramentos para visualização da densidade colorimétrica dos gases gerados.

Em todos os monitoramentos realizados, em nenhum momento a densidade da fumaça ultrapassou os 20% estabelecidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14, que equivale ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann.

5.2.2 Monitoramento da caldeira automatizada

As médias das concentrações das emissões atmosféricas que foram obtidas na combustão da lenha na caldeira automatizada encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 — Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Automatizada

Data do monitoramento	Caldeira Automatizada						
	Temperatura			Resultados com correção(O ₂ Ref. 11%)			
	Ambiente (°C)	Gases (°C)	O ₂ (%v/v)	Fator de correção	NO _x (mg.Nm ³)	SO _x (mg.Nm ³)	CO (mg.Nm ³)
27/03/2014	28	92	15,4	1,7857	100	2	521
24/04/2014	29	91	15,4	1,7857	96	13	939
22/05/2014	26	86	16,3	2,1277	74	0	187
26/06/2014	25	89	14,9	1,6393	54	46	692
Limite					NA	NA	2.500

NA - Não aplicável

Observa-se na Tabela 5 que os resultados médios para a temperatura dos gases são inferiores quando comparados com a caldeira convencional, isso ocorreu principalmente pelo fato da mesma possuir, em suas instalações, um pré-aquecedor de ar que promove a recuperação de parte do calor ainda contido nos gases, pré-aquecendo o ar ambiente (ar primário) até 140°C e também a instalação de um ventilador de ar secundário, introduzido na parte superior da fornalha especificamente para auxiliar na combustão completa do carbono.

Os óxidos de enxofre (SO_x) resultaram em uma baixa concentração, tanto que no mês de maio a média das concentrações foi de 0 mg.Nm⁻³. As baixas emissões de SO_x estão relacionadas com as baixas concentrações de enxofre presente no combustível (lenha). Todavia, os óxidos de nitrogênio obtiveram um

valor elevado, sendo muitas vezes, superior quando comparado com a caldeira convencional. Os valores encontrados para CO estiveram abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação, limitado em 2.500 mg.Nm^{-3} .

Na Figura 8 é apresentado o gráfico comparativo das concentrações do monitoramento da caldeira automatizada, realizado nos meses de março a junho de 2014, e o limite máximo de CO permitido estabelecido pela Resolução SEMA-PR Nº 016/14.

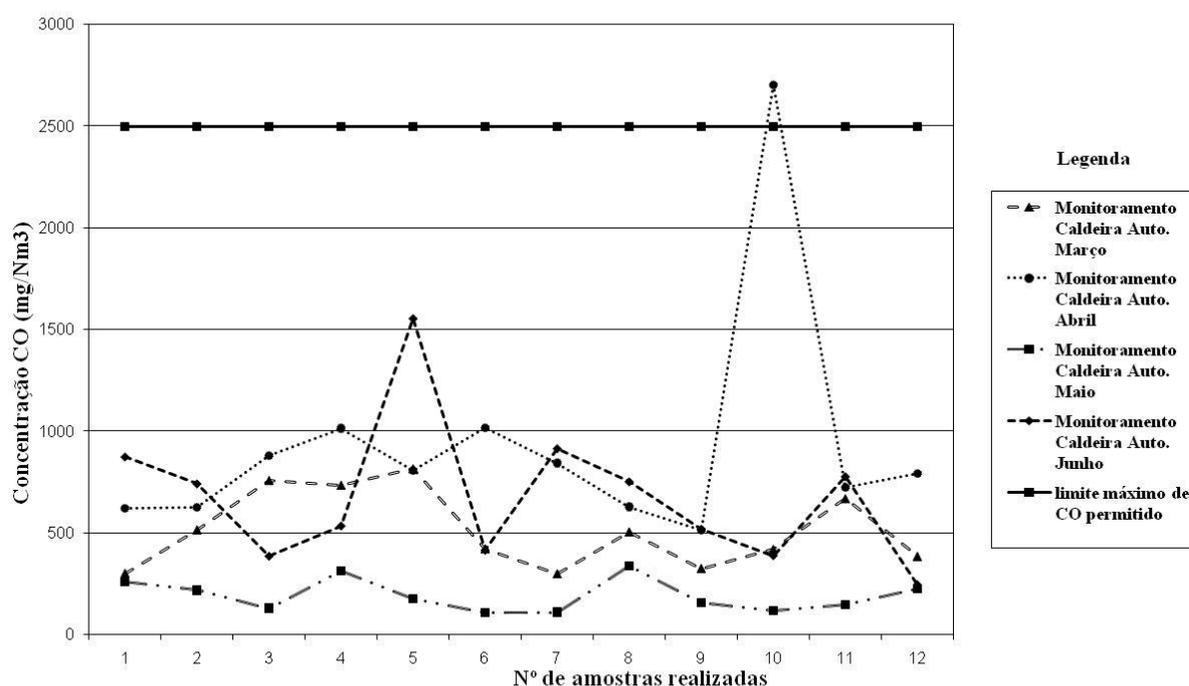


Figura 8 — Gráfico comparativo com as concentrações de CO na caldeira automatizada

A caldeira automatizada possui um projeto de fornalha mais adequado, ou seja, a combustão é processada em um maior tempo de retenção, o que favoreceu a reação mais completa do combustível (lenha) e dos voláteis gerados, e conseqüentemente, uma redução das taxas de emissão de CO.

As concentrações de monóxido de carbono (CO) medidas foram inferiores à caldeira convencional, devido ao fato da caldeira automatizada possuir diversos equipamentos integrados de controle, como o pré-aquecedor de ar, multiciclone, admissão de ar secundário etc., os quais, proporcionam condições mais adequadas e que favorecem a reação de combustão de modo que a mesma seja processada de

forma mais completa. Dentre eles destacaram-se o controle da vazão de ar admitido para a combustão e o controle da vazão de exaustão dos gases gerados. Além desses parâmetros importantes, destaca-se também a presença do pré-aquecedor de ar, que promove a recuperação de parte do calor ainda contido nos gases, pré-aquecendo o ar admitido para a combustão (ar primário).

No mês de abril de 2014, o monitoramento da caldeira automatizada teve um desempenho considerável, porém, no término do período monitorado observou-se um pico na taxa de emissão de CO por um período inferior a um minuto, retornando ao valor médio em seguida. Uma das razões que pode justificar este fato é que a lenha quando introduzida na fornalha, de forma aleatória, na maioria das vezes, formou uma estrutura engaiolada com vários espaços. No decorrer do processo de combustão, pode ocorrer um rearranjo súbito da lenha em combustão, o que provoca a liberação de grande quantidade de voláteis gerados em curto espaço de tempo, fato que aumenta a emissão de CO momentaneamente, mas retorna aos níveis normais logo em seguida.

Um aspecto importante observado nas instalações da caldeira automatizada comparada com a convencional foi o dimensionamento do sistema de isolamento térmico, o qual possuía espessura superior, proporcionando melhor isolamento e menores perdas de calor por irradiação térmica, fato que contribuiu na manutenção da temperatura adequada na fornalha, além de favorecer o rendimento térmico da caldeira e reduzir o consumo de combustível. Na caldeira convencional foi notável a perda de calor do interior de sua estrutura metálica e, isso se deu, pela deficiência no material de isolamento térmico instalado.

É interessante destacar, que para trabalhos futuros sejam avaliadas a perda de calor nas estruturas das caldeiras, pois o calor é uma forma de energia, desse modo, quanto menos calor for perdido durante o processo de geração de vapor, melhor será a eficiência das caldeiras, tendo um consumo menor de combustível.

Em nenhum momento a densidade da fumaça ultrapassou os 20% estabelecidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14, que equivale ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann.

5.3 EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO

Para realizar a eficiência de combustão das caldeiras, o analisador de gases leva em consideração algumas constantes que são fundamentais. A primeira constante analisada foi o DRY LOSS, assim representado nos extratos das medições, uma constante utilizada para a porcentagem da perda bruta do gás seco, em porcentagem, resultante da combustão. A segunda constante foi a WET LOSS, também representada desta maneira no extrato das medições, e expressa a constante utilizada para determinar a porcentagem de perda de gás úmido (%) resultante da combustão, e por último a constante μCO (perdas por monóxido de carbono), fator utilizado para calcular a porcentagem da perda de eficiência devido a emissão de monóxido de carbono.

As médias das perdas de eficiência da combustão das caldeiras (Tabela 6) foram obtidas a partir de uma média aritmética das 12 amostragens realizadas, em cada monitoramento, e por fim foram calculadas as médias aritméticas com os valores mensais, resultando em uma média geral, de cada constante, destacado na Tabela 6.

Tabela 6 — Média das perdas de eficiências da combustão das caldeiras

Data do monitoramento	Caldeira Convencional			Caldeira Automatizada		
	DRY LOSS (%)	WET LOSS (%)	μCO (%)	DRY LOSS (%)	WET LOSS (%)	μCO (%)
27/03/2014	31,2	13,4	0,5	14,9	12,8	0,2
24/04/2014	26,5	13,5	1,2	14,6	12,7	0,5
22/05/2014	30,1	13,6	0,4	16,8	12,7	0,1
26/06/2014	25,2	13,6	0,9	13,6	12,8	0,3
Média	28,3	13,5	0,8	15	12,8	0,2

Com as perdas de eficiência de combustão obtidas, foi possível determinar a eficiência (EFF) das caldeiras através da Equação 2.

$$\text{"EFF"} = 100\% - (\text{DRY LOSS} + \text{WET LOSS} + \mu\text{CO}) \quad (2)$$

As eficiências de combustão das caldeiras (Tabela 7) representam a média aritmética das 12 eficiências coletadas em cada monitoramento. Assim, a partir

desses valores, também foi realizada a média entre os meses de março a junho de 2014, tanto da caldeira convencional como da caldeira automatizada.

Tabela 7 — Média das eficiências das caldeiras

Data do monitoramento	Média da Eficiência de Combustão (%)	
	Caldeira Convencional	Caldeira Automatizada
27/03/2014	54,9	72,1
24/04/2014	58,8	72,2
22/05/2014	55,9	70,4
26/06/2014	60,3	73,3
Média	57,5	72,0

O monitoramento da caldeira automatizada nos meses de março a junho de 2014 teve uma eficiência média de 72%, sendo superior a média da eficiência da caldeira convencional que resultou em 57,5%.

Muitos são os fatores que interferem na eficiência da combustão de uma caldeira, dentre eles podemos citar a temperatura dos gases, a temperatura ambiente e o oxigênio que está sendo introduzido na fornalha. Quanto maior for a diferença entre a temperatura dos gases e a temperatura ambiente, maior será a eficiência da combustão. A concentração de monóxido de carbono (CO) também influencia na eficiência, pois quanto maior for a concentração de CO, mais energia é perdida na combustão, assim parte da energia do CO é utilizada para manter uma temperatura alta na fornalha, resultando em uma baixa eficiência. Outro fator para a baixa eficiência das caldeiras é o teor de umidade presente no combustível (lenha).

Brand (2005) realizou um estudo verificando as características energéticas de resíduos madeiráveis e a influência do tempo de armazenamento na qualidade do material. Foi realizada análise de umidade presente na lenha de *Eucalyptus* com casca, e de acordo com o autor, o teor de umidade na lenha logo após o corte foi de 53%, e após armazenamento no pátio, constatou-se que após 1 (um) mês o teor de umidade analisado foi de 44%. A partir de 4 meses armazenada, a lenha apresentou 33% de umidade e depois de 6 meses foi realizada a última análise resultando em 28%. Desta forma, foi possível associar o teor de umidade com o tempo de corte da lenha disponível para queima e, somado ao aspecto da mesma, concluir que se tratava de lenha com alta umidade.

Para Farinhaque (1981), um bom aproveitamento da combustão da madeira se dá com teores de água abaixo de 25%. Isso porque a madeira com teores acima

de 25% não só reduz acentuadamente a quantidade de calor, mas também a temperatura da câmara de combustão, dificultando a queima completa do carbono. Além disso, o excesso de umidade promove a formação de crostas de fuligem nas chaminés e no interior da câmara de combustão.

De acordo com os proprietários das lavanderias a lenha estava armazenada por um período de aproximadamente 2 meses e já estava sendo utilizada na caldeira. De acordo com estudos realizados por Brand (2005), essa lenha tinha um teor de umidade, entre 33% à 44%, muito acima do ideal, prejudicando assim a combustão.

6 CONCLUSÃO

Os dados técnicos da caldeira convencional foram obtidos através do responsável técnico pelas lavanderias industriais. Possui marca CHAMAS, modelo FTH, , com capacidade nominal de 2.000 kg.h^{-1} e potência térmica nominal de 1,92 MW. As informações técnicas da caldeira automatizada foram obtidas através do manual/ficha técnica da caldeira de marca Biochamm, modelo BGV-3000L, com capacidade nominal de 3.000 kg.h^{-1} e potência térmica nominal de 2,88 MW. Através da potência térmica nominal, foi possível verificar os padrões de lançamento dos parâmetros atmosféricos, 3.000 mg.Nm^{-3} para a caldeira convencional e 2.500 mg.Nm^{-3} para a caldeira automatizada e as frequências de amostragem, semestral e anual respectivamente, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14.

Através dos monitoramentos realizados nas caldeiras, foram adquiridas as concentrações dos poluentes, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2). A maior média da concentração de CO entre os monitoramentos da caldeira convencional foi de 2.346 mg.Nm^{-3} sendo superior quando comparada com a caldeira automatizada que resultou em 939 mg.Nm^{-3} , em que todas as concentrações estavam em conformidades com a legislação vigente. Além do analisador de gases também foi utilizado a Escala de Ringellman, e em nenhum momento as concentrações ultrapassaram o limite estabelecido, Padrão 1.

A eficiência da combustão da caldeira automatizada resultou em média 72% enquanto a caldeira convencional apresentou uma eficiência média de 57,5%. Pode-se concluir que a caldeira automatizada e dotada de pré-aquecedores, sistemas de controle de admissão de ar e tiragem de gases integrados à caldeira, geram maior eficiência de combustão do que a caldeira convencional.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, Carlos R. Curso de engenharia mecânica: **Caldeiras**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002.

BIZZO, Waldir A. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica da USP. 2003. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>>. Acesso em 23 jan. 2014.

BEZERRA, Adriana S.; FREITAS, Lucia S. **Avaliação das atividades de uma lavanderia industrial à luz da Produção Mais Limpa no polo de confecções de Santa Cruz do Capibaribe – PE**. 2013 .XVI Seminário em Administração Campina Grande, Paraíba.

BLASELBAUER, Harald. Combustão de madeira e controle de poluição em cerâmicas. Revista Novacer. Criciúma, v. 5, jun. 2010. Disponível em:<<http://pt.scribd.com/doc/86317349/Combustao-de-Madeira-e-Controlde-de-Poluicao-Em-Ceramicas>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

BRAND, Martha A.; COSTA, Valdeci J. da; DURIGON, Ailton; AMORIM, Matheus. Determinação das propriedades energéticas de resíduos de madeira em diferentes períodos de armazenamento. Relatório de pesquisa, Lages: UNIPLAC, dez. 2005.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 11 jan. 2014.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 003 de 28 de junho de 1990. **Diário Oficial da União**. Brasília. 22 ago. 1990. Seção 1 p. 15.937 a 15.939. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

CAETANO, Laércio; DUARTE JUNIOR, Luiz Antonio. Estudo comparativo da queima de óleo B.P.F e lenha em caldeiras – Estudo de caso. Journal Article, 2004. Disponível em:<http://www.abcm.org.br/xi_creem/resumos/TE/CRE04-TE01.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2014.

CASTRO, André. **Uma investigação teórico – experimental da combustão da madeira**. 2005. 374 f. Tese (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Combustão e Propulsão). Ministério da Ciência e Tecnologia, INPE, São José dos Campos, 2005.

CAVALCANTI, Paulina M.S., 2003, Avaliação dos Impactos Causados na Qualidade do Ar pela Geração Termelétrica. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CEFET – MG. **Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Curso técnico de mecânica. Disciplina de máquinas térmicas. Disponível em: <www.cefetmg.br>. Acesso em: 21 jul. 2014.

DADAM, Alessandro P. et al. Análise numérica comparativa de combustíveis utilizados em fornos túneis. **Revista Cerâmica Industrial**. Florianópolis, v. 11, n. 4, jul/ago. 2006. Disponível em: <http://srv.emc.ufsc.br/labtermo/siteLabCET/publicaV/art_cerV/ceramica%20industrial%202006.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2014.

DEL PINO, José. C.; KRÜGER, Verno; FERREIRA, Maira (1996). Poluição do Ar. Porto Alegre: Área de Educação Química.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth), e aspectos gerais de combustão. Curitiba: FUPEF, 1981. 13p. (FUPEF. Série Técnica, 6).

GALVÃO FILHO, João Baptista. **Poluição do ar**: aspectos técnicos e econômicos do meio ambiente. São Paulo, 25f, 1989. Disponível em: <http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/poluicao_do_ar.pdf>. Acessado em: 23 jan. 2014.

LEITE, Nilson R.; MILITÃO, Renato de A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. PROMINP –ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS. Disciplina : Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica. 2008

MARTINS, Fernando R.; Guarnieri, R A; PEREIRA, E B. Aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São José dos Campos, v. 30, n.1. 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/301304.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

MOREIRA, Lenice C. O. Comparação entre os poluentes atmosféricos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A. **Interações (Campo Grande)[online]**. 2012, vol.13, n.1, pp. 49-57. ISSN 1518-7012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1518-70122012000100005>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

NASCIMENTO, Luiz F. C. et al. Efeitos da poluição atmosférica na saúde infantil em São José dos Campos, SP. **Revista Saúde Pública**, São Paulo, v. 40, n. 1, Jan/Fev. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-89102006000100013&script=sci_arttext>. Acesso em: 10 dez. 2013.

PARANÁ. Resolução SEMA nº 016, de 26 de março de 2014. Diário Oficial. Curitiba, PR, 27 dez. 2014. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_16_2014.pdf>. Acesso em: 23 julho 2014.

PETROBRÁS. **Ficha de informação de segurança de produto químico – óleo de xisto IAP**. Disponível em: <<http://www.br.com.br>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

PIRES, Dilson O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2005. 188 f. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

Pinheiro, P. C. C., Valle, R. M., Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar. In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 1995, Rio de Janeiro. Anais do II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Rio de Janeiro, RJ : ABIQUIM, 1995. v. 1. p. 157-162.

RIBEIRO, Ivano.; VICARI, Cristian C. Análise de viabilidade econômica para secagem de milho com gás liquefeito de petróleo. In: SEMINÁRIO DO CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS, 4., 2005, Cascavel, PR. **Anais...** Cascavel, 2005. Disponível em: <<http://www.unioeste.br/campi/cascavel/ccsa/IVSeminarario/IVSeminarario/Artigos/07.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

SERFATY, R. **Combustão e queimadores**. CENPES. 2007.

SINDITÊXTIL – **Sindicado das Indústrias Têxteis do Estado de São Paulo**. Site: <http://www.sinditextilsp.org.br>. Acesso em 21 jul.2014.

TEMPEST 100. **Manual de instruções**. São Paulo, 2011. 23 p.

TORREIRA, Raul P. Geradores de Vapor. Editora Libris, São Paulo, 1995.

APÊNDICE A — Extrato das medições da caldeira automatizada

APÊNDICE B — Extrato das medições da caldeira convencional

APÊNDICE C — Planilha das medições