

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO *LATO SENSU* ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS A GÁS NATURAL E APROVEITAMENTO DOS
GASES DE EXAUSTÃO PARA NEUTRALIZAÇÃO DO EFLUENTE ALCALINO NUMA
TINTURARIA DE ALGODÃO**

JOSÉ GREGORIO FONZAGHI MAZZUCCO

Monografia

São Paulo – SP

2012

JOSÉ GREGORIO FONZAGHI MAZZUCCO

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS A GÁS NATURAL E
APROVEITAMENTO DOS GASES DE EXAUSTÃO PARA
NEUTRALIZAÇÃO DO EFLUENTE ALCALINO NUMA
TINTURARIA DE ALGODÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Universidade de São Paulo – São Paulo / SP como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Helena Lara dos Cantos Matai.

São Paulo – SP

2012

Resumo

O foco em desenvolvimento sustentável tem se tornado uma questão ética, um compromisso com o respeito ao ser humano e ao ambiente local e global. Neste contexto, a tinturaria têxtil deve equacionar suas questões ambientais considerando uma visão ampla de seus processos. O objetivo deste trabalho é apresentar um caso de sucesso de uma tinturaria têxtil de algodão na busca de eficiência da caldeira, na redução de consumo de vapor na tinturaria e na redução das emissões de dióxido de carbono na saída da caldeira através da neutralização do efluente. A metodologia usada compreende coleta de dados primários em campo. Para tanto, o trabalho conta com uma revisão da literatura específica. Os resultados mostram não apenas uma economia de gás natural da ordem de 20%, mas um consumo mais regular deste e uma economia financeira relevante no processo de neutralização do efluente da tinturaria. A gestão completa contou com uma considerável complexidade técnica e operacional além de recursos externos. Os aspectos de qualidade contribuem para a redução do consumo de recursos e dos impactos ambientais. A visão por processo é uma ferramenta prática e relevante para a busca de melhorias que devem focar competitividade e sustentabilidade.

Abstract

The focus on sustainable development has become an ethical issue, a commitment for human beings and for the local and global environment. In this context, the textile dyeing must equating their environmental issues considering a broad view of their processes. The objective of this work is to present a success story in a cotton dyehouse in terms of boiler efficiency, reducing steam consumption in dyeing process and reducing emissions of carbon dioxide leaving the boiler through the neutralization of the effluent. The methodology includes primary data collection in the field. Therefore, the work has a literature review. The results show 20% reduction in natural gas

consumption, a regular consumption and a significant financial savings in the neutralization process of the dyeing effluent. The complete management had considerable technical and operational complexity and external resources. The quality aspects contribute to the reduction of resource consumption and environmental impacts. The vision process is a practical tool and relevant to obtain improvements that must focus on competitiveness and sustainability.

Sumário

Resumo	3
Abstract	3
1 Glossário	5
2 Introdução	8
3 Objetivo	9
4 Metodologia	9
5 Revisão da literatura.....	10
5.1 Economia de gás natural em caldeiras	11
5.1.1 Geradores de vapor ou caldeiras.....	12
5.1.2 A combustão.....	14
5.1.3 Balanço Térmico	17
5.1.4 Queimadores	19
5.2 Economia de vapor em tinturarias	19
5.2.1 A termodinâmica e a cinética do tingimento	19
5.2.2 A visão econômica na tecnologia de uma tinturaria.....	24
5.3 Aproveitamento dos gases de exaustão – conceito e vantagens.....	28
6 Estudo de Caso	30

6.1	Definição dos focos de trabalho e dos indicadores.....	30
6.2	As propostas de melhorias	33
6.3	Aproveitamento dos gases de exaustão.....	41
7	Resultados	43
8	Conclusões.....	47
9	Bibliografia.....	49

1 Glossário

Alvejamento: nome dado à operação que visa eliminar do substrato natural as impurezas elementares que lhe proporcionam coloração pardacenta. Consiste normalmente em processos de oxidação ou redução química.

Autoclave: aparelho para tingir sob pressão.

Banho de preparação: a migração do corante do banho para a fibra requer, muitas vezes, uma fase preparatória que envolve umectação do material, purgas, alvejamento dentre outros.

Banho de tingimento: o tingimento ocorre normalmente por imersão do material têxtil a ser tingido num banho de água, corante e produtos químicos auxiliares ao tingimento. Este banho é denominado banho de tingimento.

CIELab: sistema de codificação matemática de cores criada pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), cujos critérios são baseados na percepção da cor pelo olho humano.

CPI: índice de desempenho de cor. Resultado do tingir certo da primeira vez (RFT) multiplicado pelo percentual de lotes com uma diferença instrumental de cor (ΔE) menor do que um determinado valor considerado, sendo este adotado de acordo com

o objetivo de melhoria. Trata-se de um artifício matemático para vincular a produtividade à qualidade do tingimento.

Emulsão: mistura entre dois líquidos imiscíveis em que um deles (a fase dispersa) se encontra na forma de finos glóbulos no seio do outro líquido (a fase contínua), formando uma mistura estável. Na emulsão de óleo em água, o óleo é a fase dispersa.

Energia livre de Gibbs: grandeza que visa medir a totalidade de energia atrelada a um sistema termodinâmico disponível para execução de trabalho útil.

Entalpia: grandeza termodinâmica que mede a máxima energia de um sistema termodinâmico, teoricamente passível de ser deste removida na forma de calor.

Entropia: grandeza termodinâmica que mensura o grau de irreversibilidade de um sistema, encontrando-se geralmente associada ao que se denomina por desordem de um sistema termodinâmico.

Igualização: nível de igualização da cor de um material têxtil.

Igualizante: produto químico auxiliar do tingimento com o objetivo de melhorar a uniformidade da aplicação do corante e, portanto, da cor ao longo do material têxtil.

Lubrificação em banho: linhas de costura passam por processo de lubrificação. O lubrificante pode ser aplicado de diferentes formas. Dá-se o nome de lubrificação em banho quando este processo ocorre na própria máquina de tingir, podendo ocorrer antes, durante ou após o tingimento. Para tanto, o lubrificante se aplica em forma de emulsão de óleo em água.

Mercerização: beneficiamento do algodão que consiste num processo de estiramento e imersão em soda cáustica concentrada. Ocorre uma mudança morfológica molecular da celulose que resulta em maior brilho, além de um pequeno incremento na resistência do material.

Mol: quantidade de matéria de um sistema que contém tantas entidades elementares quanto são os átomos contidos em 0,012 kg de carbono-12.

PLC: comunicação através da linha de força. Esta comunicação utiliza a rede de energia elétrica.

Poder calorífico inferior (PCI): quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) libertada na oxidação de um determinado combustível em forma de calor.

Purga (ou lixiviação): processo de eliminação da gordura superficial do algodão. Este ocorre em meio alcalino em presença de detergentes ou sabões e por ação da temperatura.

Repetitividade: variação das medidas obtidas por um único operador, utilizando o mesmo equipamento de medição e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma única peça (corpo de prova).

Reprodutibilidade: variação das medidas obtidas por diferentes operadores, ou entre equipamentos de medição ou ainda entre método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma única peça (corpo de prova).

RFT: *right first time* (fazer certo da primeira vez). Em tinturarias significa tingir sem retrabalho algum.

Solidez: resistência da cor aplicada num material têxtil em termos de transferência e alteração.

Tingimento reativo: tingimento com corantes de classe reativa em que ocorre uma reação química. Nem toda fixação de corante no material têxtil envolve uma reação química. Pontes de hidrogênio e interações hidrofóbicas também podem ocorrer a depender da classe de corante. A solidez resultante depende da afinidade química envolvida no tingimento.

Título em dtex: densidade linear de um fio têxtil expresso em decigramas por quilômetro.

Valor agregado: todo aumento de valor em processo em que o cliente está disposto a pagar ou que tem a intenção de se acertar na primeira vez (sem retrabalhos).

ΔE : diferença instrumental de cor entre amostra e padrão com base no sistema CIELab.

ΔL : diferença instrumental de intensidade de cor entre amostra e padrão no sistema CIELab.

2 Introdução

A indústria têxtil apresenta uma cadeia produtiva longa. Qualquer ganho de eficiência e produtividade contribui para a continuidade do negócio no Brasil. Da mesma forma, uma visão de desenvolvimento sustentável tem se tornado uma questão ética, um compromisso com o respeito ao ser humano e ao ambiente local e global.

Em tinturarias têxteis, o vapor é necessário para aquecimento dos banhos no tingimento tanto de fibras naturais como artificiais e sintéticas. O vapor é gerado pelo aquecimento da água por troca de calor num processo de combustão. O combustível usado pode ser um gás, como o gás natural, um líquido, como um óleo mineral ou ainda um sólido, como no caso de resíduos de biomassa. Como resultado da combustão obtém-se o gás carbônico, ou dióxido de carbono, cujo efeito estufa tem sido objeto de estudo e análise da ciência e dos governos no mundo todo.

O efluente de uma fábrica onde se tingem algodão, tende a apresentar valores de pH elevados. É possível eliminar esta alcalinidade a partir da neutralização com o dióxido de carbono que sai da caldeira. Dois são os benefícios:

- Redução de emissão de gás carbônico na atmosfera: principal contribuinte para o efeito estufa e consequente aquecimento global;
- Economia no processo de neutralização do efluente quando requerida para adequação aos requisitos de pH da RESOLUÇÃO CONAMA Nº 20, de 18 de junho de 1986.

A complexidade termodinâmica que envolve um tingimento permite a busca de redução de consumo tanto de energia como de insumos. Uma redução de consumo de

vapor implica numa redução de consumo de gás natural. Além da economia financeira, há uma redução da emissão dos gases de exaustão, ricos em de dióxido de carbono.

3 Objetivo

Como objetivo geral, o trabalho apresenta um caso de sucesso numa tinturaria têxtil, na busca de eficiência de caldeira em termos de consumo de gás natural por quilo processado (processado e não produzido, pois o percentual de reprocesso não é desprezível) e uma redução de consumo de vapor por quilo produzido, assim como a redução das emissões de dióxido de carbono na saída da caldeira através da neutralização do efluente de uma tinturaria de algodão no ramo têxtil.

Este trabalho se divide em três etapas (objetivos específicos):

- Análise de melhoria na eficiência de uma caldeira: uma análise de quais são os parâmetros técnicos da instalação de uma caldeira, visando à redução de consumo de gás natural por quantidade de vapor produzido;
- Análise de melhoria na eficiência da tinturaria: uma abordagem de quais são as questões relacionadas ao processo de tingimento a serem consideradas no estudo de redução de consumo de vapor;
- Apresentação de um caso de sucesso de uma tinturaria, tanto na busca de economia de vapor e de gás natural, como no aproveitamento dos gases de exaustão para neutralização do efluente alcalino.

4 Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo de caso basicamente compreende coleta de dados primários em campo. Dados estes relativos a consumos de gás natural, volume de produção, resultados de qualidade, investimentos financeiros e retornos sobre

estes investimentos. A sistematização destes dados visa o entendimento do estudo de caso de sucesso de economia de gás natural na produção de vapor numa tinturaria têxtil e aproveitamento do gás de exaustão da caldeira na neutralização do efluente alcalino, sendo este seu principal impacto ambiental. Para tanto, o trabalho conta com uma revisão da literatura específica ao tema. Assim, o foco desta revisão abrange conceitos e o estado da arte tanto no tema de geração de vapor em caldeira como no tema tingimento em indústria têxtil.

5 Revisão da literatura

A partir da versão 2000 da ISO 9001, as empresas aprenderam a substituir a visão departamental pela visão por processos com ganhos em eficácia e eficiência. Essa visão por processo, numa abordagem de sustentabilidade, considera como parte da entrada, os recursos, e como parte da saída, os impactos, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 9004:2010 (Gestão para o sucesso de uma organização – Uma abordagem da qualidade), e em particular nos itens 4.4 (Necessidades e expectativas das partes interessadas) e 6.8 (Recursos naturais).

A abrangência deste estudo advém desta visão. O fluxograma parcial da Figura 1 explica a origem da abordagem e construção do tema gás natural:

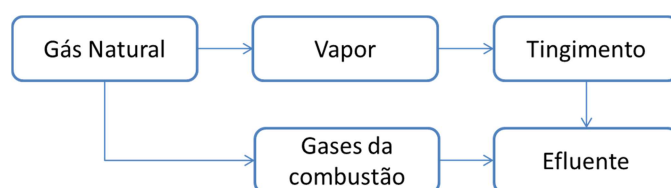


Figura 1: Fluxograma que relaciona o gás natural a uma tinturaria. Fonte: elaboração do autor.

A partir deste quadro percebe-se que uma economia de gás natural passa por dois estágios: eficiência da caldeira, onde o vapor é produzido, com economia de gás natural, e eficiência de tinturaria, com economia de vapor e, portanto, de gás natural. O fluxo também permite uma rápida visualização de uma possível neutralização do

efluente alcalino proveniente de uma tinturaria de algodão, pelos gases da combustão, ricos em dióxido de carbono, que em meio aquoso, geram o ácido carbônico.

O foco na eficiência no processo de tingimento, para além da caldeira, pode trazer muitos outros benefícios além do consumo de vapor, da mesma forma que num estudo voltado para a melhoria da eficiência do consumo de combustível no transporte urbano, pode ter maior relevância um olhar holístico do sistema de transporte do que um olhar técnico voltado especificamente ao combustível ou ao veículo.

Em tinturarias, o foco econômico mais relevante reside no aspecto de qualidade, como será justificado no capítulo 3.2.1 A termodinâmica e a cinética do tingimento. Outro parâmetro que deve ser considerado quando o assunto é economia, se refere à tecnologia. Equipamentos mais recentes tendem a consumir uma menor quantidade de água, e por consequência, menor quantidade de energia.

Quanto à busca de eficiência em caldeiras, a solução mais rápida é a substituição de caldeiras velhas por novas, com melhor tecnologia, porém, as instalações e os controles, contribuem para o resultado.

5.1 Economia de gás natural em caldeiras

O uso do gás natural como combustível em caldeiras apresenta muitas vantagens em relação ao óleo. A principal vantagem é que o gás é um produto significativamente mais limpo do que o óleo. Por ser praticamente isento de água, enxofre e partículas, diminui o risco de corrosão, seja na caldeira como nas tubulações. Por esta mesma razão, o gás natural apresenta vantagens ambientais e relacionadas à segurança em relação ao óleo ou combustíveis sólidos. (MONTEIRO E SILVA, 2010).

Outra vantagem do gás natural é que o fato de se apresentar no estado gasoso, facilita a homogeneização com o ar nos queimadores como será visto no capítulo 3.1.4 Queimadores. (BEGA, 2003).

5.1.1 Geradores de vapor ou caldeiras

O vapor requerido para uma tinturaria é o vapor saturado. Este é produzido em caldeiras pressurizadas que geram vapor saturado a aproximadamente 150°C. Uma caldeira é um trocador de calor entre os gases de combustão e água, tendo como resultado a geração de vapor. (MONTEIRO E SILVA, 2010).

A primeira classificação de uma caldeira se refere ao produto que flui na parte interna no conjunto de tubos. No sistema mais comum, o fogo do processo de combustão, é direcionado para dentro dos tubos, e a água envolve os tubos pelo lado externo. Esta é a caldeira fogotubular, ou ainda, flamotubular. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

A Figura 2 apresenta um esquema simplificado de uma caldeira fogotubular.

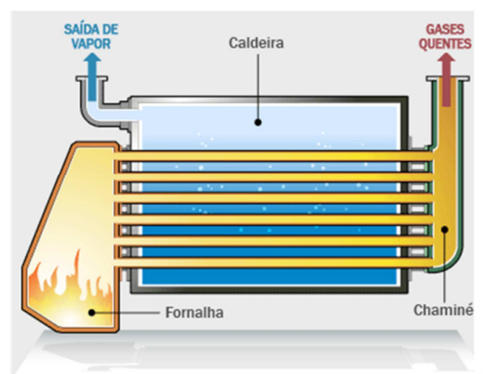


Figura 2: Esquema simplificado de uma caldeira fogotubular. Fonte: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor2.htm> (agosto, 2012)

Na caldeira do tipo aquatubular, a água circula por dentro dos tubos, enquanto o fogo e os gases decorrentes da combustão estão do lado de fora destes tubos. Estas caldeiras apresentam alta eficiência na geração de vapor, porém têm um custo mais elevado e requerem um maior cuidado no tratamento da água. São utilizadas na geração de vapor superaquecido. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

As caldeiras para geração de vapor saturado, e, portanto, destinadas a tinturarias, são do tipo fogotubular.

A Tabela 1 mostra as faixas de temperatura e usos mais comuns de vapor saturado e superaquecido.

Tabela 1: Usos mais comuns e faixas de temperatura para vapor saturado e superaquecido. Fonte: Botelho e Bifano, (2011).

Tipo de vapor	Uso mais comum	Faixa de temperatura
Saturado	Aquecimento	110 a 200°C
Superaquecido	Acionamento de equipamentos	200 a 500°C

Caldeiras são sistemas fechados, ou seja, há reaproveitamento da água de condensação. Quanto maior a temperatura da água de retorno, maior a eficiência da caldeira, isto porque requerem menor calor específico para que a água chegue à temperatura de ebulição. A temperatura desta água de condensação resulta próxima de 90°C. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

Ainda que o sistema seja fechado, existem perdas de vapor e perdas de condensado retirado nos purgadores, para garantia de que o vapor que chega ao ponto de uso seja seco. Desta forma, há necessidade de reposição da água perdida. Para tanto, convém que esta água seja aquecida previamente, a partir de um trocador de calor aproveitando um pouco do próprio vapor gerado na caldeira. Este trocador opera com pressão e aquece a água a uma faixa de temperatura entre 50 e 60°C. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

O esquema da Figura 3 representa uma possível forma de circulação e reposição de água. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

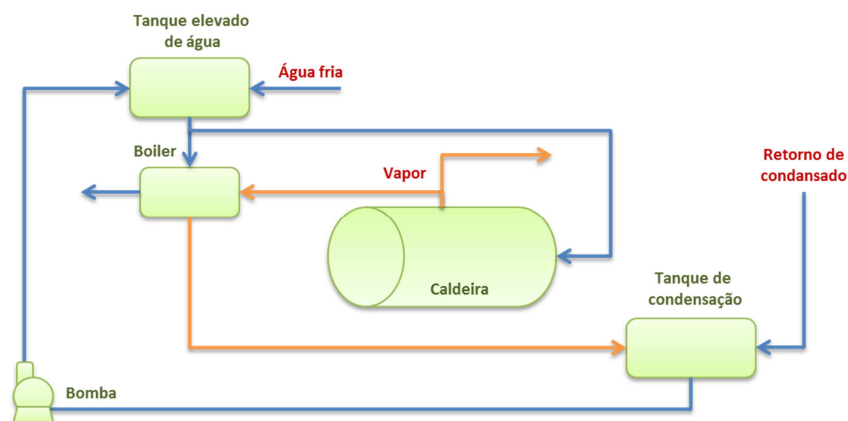


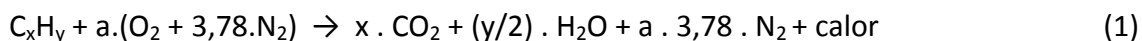
Figura 3: Esquema de circulação e reposição de água. Fonte: Botelho e Bifano (2011).

5.1.2 A combustão

Como reação exotérmica de oxidação química, o que se deseja da combustão é a geração de calor. As três formas de transmissão de calor: radiação, convecção e condução, são relevantes no processo térmico das caldeiras com queima de combustível. O fogo da combustão é a principal fonte de radiação, os gases formados geram principalmente a convecção, e nos tubos, ocorre principalmente a condução. Enquanto a convecção e a condução são diretamente proporcionais à temperatura absoluta, a radiação, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Isto torna a radiação relevante em altas temperaturas, como nas caldeiras. (MONTEIRO E SILVA, 2010).

Além da estequiometria, uma combustão completa deve levar em consideração a intensidade da temperatura, a turbulência e o tempo de residência na câmara da combustão dos reagentes (combustível e comburente). (MONTEIRO E SILVA, 2010).

A reação de combustão é dada de forma genérica pela Equação 1.



Pelo balanço do oxigênio podemos escrever a Equação 2.

$$a = x + y/4 \quad (2)$$

A fim de se obter a combustão completa, ou seja, minimizar a formação de monóxido de carbono, que além de gerar menos calor, é tóxico, adota-se um excesso de ar, cujo coeficiente é dado pela Equação 3.

$$\lambda = \text{massa de ar utilizada} / \text{massa de ar estequiométrica} \quad (3)$$

Embora uma pequeníssima parte do nitrogênio reaja com o oxigênio do comburente formando os óxidos de nitrogênio (NO_x), o restante é aquecido graças ao calor de combustão. Sendo o nitrogênio o principal elemento componente do ar, deve-se considerar que quanto mais ar, maior o desvio de calor para o aquecimento do nitrogênio, diminuindo a temperatura gerada na combustão.

A Figura 4 representa a tendência das perdas de energia em função da falta ou excesso de ar, o que evidencia uma preferência por um excesso de ar do que falta de ar, provocando uma combustão parcial. (BEGA, 2003).

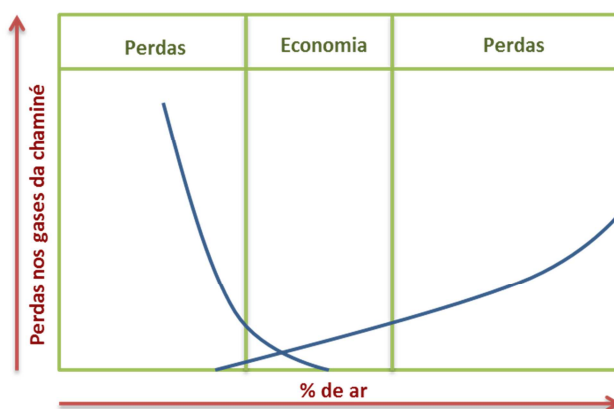


Figura 4: Gráfico que mostra uma maior tendência de perdas por falta de ar do que por excesso deste. Fonte: Bega (2003).

Conhecendo-se a composição do gás natural, é possível determinarmos a quantidade de ar estequiométrica requerida na reação da Equação 1.

A Tabela 2 mostra a composição do gás natural em volume.

Tabela 2: Composição típica do gás natural. Fonte: Monteiro e Silva (2010).

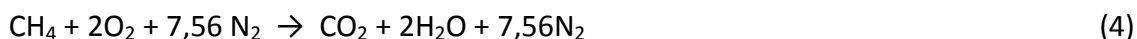
Composto Químico	% em volume
Metano	89,0
Etano	6,0
Propano	1,8
C ₄ ou +	1,0
CO ₂	1,5
N ₂	0,7

Se aplicarmos os valores de x e y dos três principais componentes da Tabela 2 na reação de combustão da Equação 1, é possível determinar a quantidade de ar estequiométrica desta reação, assim como a quantidade formada de gases na combustão. A Tabela 3 mostra os valores de x e y para o metano, etano e propano.

Tabela 3: Valores de x e y para o metano, etano e propano de acordo com os números de moles nas fórmulas dos três compostos. Fonte: Monteiro e Silva (2010).

Composto Químico	Fórmula	valor de x	valor de y
Metano	CH ₄	1	4
Etano	C ₂ H ₆	2	6
Propano	C ₃ H ₈	3	8

No caso da reação estequiométrica de combustão aplicada ao metano, obtém-se a Equação 4.



Para cada mol de metano são requeridos dois moles de oxigênio. Convertendo-se em massa a partir da massa molecular, 16 gramas de metano correspondem a 64 gramas de oxigênio, ou ainda, uma relação em massa de 1 unidade de metano para 4 unidades de oxigênio.

A Tabela 2 mostra uma proporção dos componentes em percentual em volume. A partir das densidades do gás natural, de 0,714 kg/Nm³, e do metano, que é de 0,817 kg/Nm³, obtém-se a proporção em massa dada pela Equação 5.

$$\%m_{\text{metano no GN}} = 0,714 \times 89 / 0,817 = 77,8\% \quad (5)$$

Fazendo-se os mesmos cálculos para o etano, propano e demais gases, obtém-se a Tabela 4. (MONTEIRO E SILVA, 2010).

Tabela 4: Vazões de ar e de gás na combustão completa do gás natural, considerando o excesso de ar. Fonte: Monteiro e Silva (2010).

Vazão	Unidade	Ar	Gases
Em massa	kg/kg de GN	$16,3 \times \lambda$	$(16,3 \times \lambda) + 1$
	kg/Nm ³ de GN	$16,3 \times \lambda \times 0,817$	$[(16,3 \times \lambda) + 1] \times 0,817$
	kg/MJ	$0,35 \times \lambda$	$[(16,3 \times \lambda) + 1] / 47,168$
Em volume	Nm ³ /kg de GN	$(16,3 \times \lambda) / 1,287$	$[(16,3 \times \lambda) / 1,287] \times 0,817$
	Nm ³ /Nm ³ de GN	$[(16,3 \times \lambda) / 1,287] \times 0,817$	$\{[(16,3 \times \lambda) + 1] \times 0,817\} / 1,365$
	Nm ³ /MJ	$0,35 \times \lambda / 1,287$	$[(16,3 \times \lambda) + 1] / (47,168 \times 1,365)$
Dados	$\rho_{\text{gás natural}} = 0,817 \text{ kg/Nm}^3$		
	$\rho_{\text{ar}} = 1,287 \text{ kg/Nm}^3$		
	$\rho_{\text{gases de combustão}} = 1,365 \text{ kg/Nm}^3$		
	$\text{PCI}_{\text{gás natural}} = 47,168 \text{ kJ/kg}$		

5.1.3 Balanço Térmico

O objetivo do processo na caldeira é gerar calor para gerar vapor. A massa de vapor produzida continuamente, expressa normalmente em kg/h, é dada pela Equação 6.

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = Q / (h_{\text{saída do vapor}} - h_{\text{alimentação da água}}) \quad (6)$$

onde Q representa a capacidade de produção de calor no sistema e h, as respectivas entalpias da água em seus estados físicos na entrada e na saída.

A partir da Equação 6, da vazão de combustível e do poder calorífico inferior (PCI) do combustível, o rendimento global η é dado pela Equação 7.

$$\eta = \dot{m}_{\text{vapor}} \times (h_{\text{saída do vapor}} - h_{\text{alimentação da água}}) / (\dot{m}_{\text{combustível}} \times \text{PCI}_{\text{combustível}}) \quad (7)$$

As perdas envolvidas no processo podem ser de dois tipos: normais, esperadas no projeto e devidas ao segundo princípio da termodinâmica, e ocasionais, não esperadas

no projeto. Estas são relacionadas à operação e manutenção, e devem ser minimizadas e controladas. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

O gás natural apresenta diversas vantagens de ordem ambiental, pois pode ser considerado limpo se comparado com outros combustíveis, mas também porque se pode considerar a sua umidade como próxima de zero. A umidade presente em um combustível é considerada perda, pois consome calor para a vaporização da água que sai com os gases de exaustão. (MONTEIRO E SILVA, 2010).

Dentre as perdas inesperadas, pode-se considerar: falta ou excesso de ar, ineficiência na mistura combustível comburente e tratamento inadequado da água de entrada. O oxigênio dissolvido na água pode provocar a corrosão dos metais da caldeira, e os sólidos dissolvidos não saem com o vapor, formando incrustações de sais com condutividades térmicas significativamente inferiores às dos materiais que compõem a caldeira. (BOTELHO e BIFANO, 2011).

A Tabela 5 mostra alguns valores de condutividade térmica.

Tabela 5: Valores aproximados de condutividade térmica de ligas de caldeiras e de incrustações. Fonte: Tabela da Empresa Kurita (2012).

Composto Químico	Condutividade Térmica [kcal.m ⁻² .h ⁻¹ .°C ⁻¹]
Liga de cobre	320 a 360
Liga de aço carbono	40 a 60
Incrustação em base de sulfato	0,6 a 2,0
Incrustação em base de carbonato	0,4 a 0,6
Incrustação em base de sílica	0,2 a 0,4

A incrustação de sais provoca uma resistência térmica à transmissão de calor por condução, diminuindo a eficiência da caldeira. Tratamentos da água devem ser previstos, assim como manutenções regulares das caldeiras.

Ainda de acordo com Botelho e Bifano, 2011, o controle da temperatura de saída da caldeira é fundamental, e um desvio em relação ao indicado pelo fabricante, pode indicar um problema de ineficiência.

5.1.4 Queimadores

Os queimadores são os responsáveis pelo fornecimento da mistura, na correta dosagem e relação, de combustível e comburente. Também são os responsáveis pela ignição e pela estabilidade da chama. A fim de se obter uma maior eficiência, os queimadores devem permitir a variação da capacidade da queima. (BEGA, 2003).

A ignição pode ser manual, bico de gás, ferro incandescente, tocha ou maçarico, ou pode ser automática, considerando um relé de programação e controle da chama. Esta segunda opção confere maior confiabilidade e eficiência no começo da formação da chama. (BEGA, 2003).

Da mesma forma, as vazões de combustível e comburente podem ser controladas manualmente, mas o ideal é que esta regulação seja automática e com controle modulante, onde é possível variar estas vazões. Monteiro e Silva (2010) destacam a tendência de sistemas de gerenciamento digital do processo de combustão, permitindo otimização com controle do excesso de ar com base na leitura de oxigênio presente na mistura.

5.2 Economia de vapor em tinturarias

5.2.1 A termodinâmica e a cinética do tingimento

O consumo de vapor em tinturarias ocorre tanto no processo de branqueamento como no tingimento. Este segundo merece maior atenção quando o tema é economia de vapor, uma vez que o universo de cores é considerável e a reprodutibilidade de cor é um desafio.

Numa visão simplificada do tingimento, onde não se consideram propriedades específicas de cada substrato e das classes de corante, mesmo porque não é objeto deste estudo, é possível dividir o tingimento em quatro etapas distintas:

- Migração do corante: também conhecida como montagem, é a fase em que o corante migra do banho para a fibra;
- Adsorção do corante: fase onde ocorre a aderência do corante na superfície da fibra;
- Difusão do corante: o corante entra parcialmente na fibra;
- Fixação: seja por uma reação, ponte de hidrogênio ou interações hidrofóbicas, o corante resulta aprisionado na fibra.

O processo de tingimento, de forma genérica, resulta num estado de mais ordem do corante, que migra do banho para a fibra. Logo, parte-se de um estado de maior entropia para um de menor entropia. É uma afinidade química, que pode ser uma reação ou uma ponte de hidrogênio, o que explica o tingimento. (TROTMAN, 1984).

Considerando-se a Equação da energia livre de Gibbs, definida conforme a Equação 8.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

onde ΔG é a variação da energia livre de Gibbs, ΔH é a variação de entalpia do sistema, T é a temperatura do sistema e ΔS é a variação de entropia. Entenda-se como sistema o material a ser tingido e o banho de tingimento.

Para que ocorra o tingimento, ΔG deve ser negativo, sendo possível perceber que uma diminuição de temperatura favorece o rendimento do tingimento. Como a reação é exotérmica, ou seja, o valor de ΔH é negativo, e a entropia do sistema diminui, ou ainda, o valor de ΔS é negativo, o rendimento do tingimento é favorecido em temperaturas mais baixas. Mas o tingimento ocorre normalmente em temperaturas mais elevadas, compreendidas entre 60 e 90°C no caso de fibras celulósicas e entre 100 e 130°C para têxteis sintéticos. O aquecimento se deve a um ganho considerável de tempo de reação pelo aumento de choques efetivos, ainda que, obtendo-se um menor rendimento final, que é dado pela razão entre a quantidade de corante na fibra e a quantidade de corante no banho. (TROTMAN, 1984).

O desmembramento da definição matemática da entalpia auxilia o entendimento da escolha de temperatura e pressão de acordo com a classe de tingimento. A entalpia é definida de acordo com a Equação 9.

$$H = U + pV \quad (9)$$

onde U representa a energia interna do sistema, p é a pressão e V o volume do sistema.

O primeiro parâmetro U se refere à energia interna do sistema e depende não apenas da energia cinética das partículas como também da energia de ligações químicas. No caso de tingimentos celulósicos, o primeiro membro da equação da entalpia do banho, U, é o elemento que determina a eficiência do tingimento. Estes são os chamados tingimentos químicos. (SALEM, 2010).

No tingimento do poliéster, o banho é submetido a uma pressão estática que varia entre 3 e 5 kgf/cm² a fim de se obter uma temperatura de 130°C, necessária para a abertura da estrutura da fibra. O segundo membro pV da equação da entalpia do banho, que corresponde ao trabalho de fluxo do sistema, passa a ganhar relevância em máquinas com circulação de banho, onde uma bomba promove uma diferença de pressão da ordem de 0,5 kgf/cm². A pressão diferencial permite a circulação do banho. Ambos os fatores: pressão estática e diferença de pressão são relevantes para a fase de difusão do corante no tingimento do poliéster. Todo o processo ocorre a partir de interações hidrofóbicas e estes são os chamados tingimentos térmicos. (TROTMAN, 1984).

Um teste realizado em agosto de 2012 em laboratório da Coats Brasil em máquina italiana Ugolini para tingimento de fios, mostrou a relevância da pressão diferencial para o resultado de reprodutibilidade da cor. A máquina permite o tingimento de 6 diferentes cores simultaneamente, conforme o esquema da Figura 5.

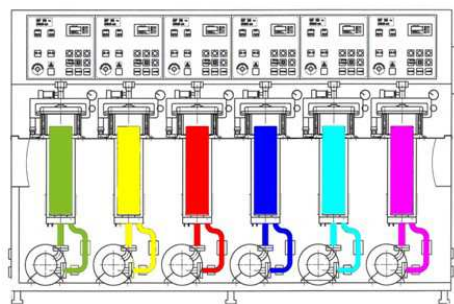


Figura 5: A máquina de laboratório da Ugolini permite 6 tingimentos simultâneos. Fonte:

<http://www.ugolini.net/ita/prodotti.php?idd=83>.

A Figura 6 mostra a relação entre o resultado da cor de um tingimento de fio de poliéster em função da leitura da pressão diferencial do banho. O resultado foi obtido experimentalmente e ajustes foram feitos em seguida com a reprodutibilidade restaurada. Este estudo se repetiu por 3 vezes, e a conclusão é que em cores pálidas o desvio quase não se percebe, porém em cores de intensidade média e alta, o efeito é considerável.

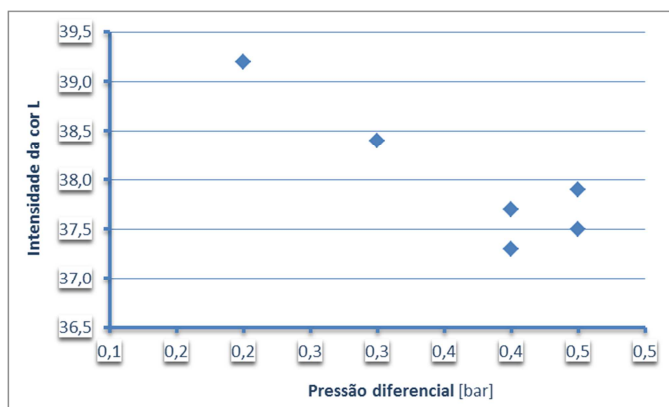


Figura 6: Relação entre o resultado da intensidade cor L após tingimento em função da pressão a 130°C. Quanto maior L, mais fraca a cor. Esta é uma cor média para intensa. Fonte: Estudo de repetitividade e reprodutibilidade de agosto de 2012 da máquina Simplex na Coats Brasil.

Considera-se como aceitável uma diferença de intensidade de cor entre amostras ΔL de até 0,6. A Tabela 6 representa os resultados de leitura e a determinação da diferença de intensidade em relação ao primeiro autoclave da máquina SX-01.

Tabela 6: Resultados da diferença de cor ΔL em relação à autoclave SX-01. Fonte: Estudo de repetitividade e reprodutibilidade de agosto de 2012 da máquina Simplex na Coats Brasil

kier	ΔL	Laudo
SX-01	0,0	-
SX-02	0,4	Aprovada
SX-03	0,2	Aprovada
SX-04	1,9	Reprovada
SX-05	1,1	Reprovada
SX-06	0,6	Aprovada

A necessidade de uma ação cinética com elevação da temperatura é a razão do consumo de vapor no processo de tingimento. Mas também a razão de dificuldades em reprodutibilidade e de limitações nos resultados de solidez provocadas por limitação na fixação dos corantes. De acordo com SALEM (2008):

“A permanência do corante na fibra é afetada por vários fatores:

- Vibração da estrutura molecular da fibra, a cada momento, tomando novas configurações;
- Durante o tingimento, constante bombardeio do corante pelas moléculas da água, dificultando sua fixação na fibra;
- Com o aumento da temperatura do sistema, aumenta a vibração das moléculas da fibra e o bombardeio das moléculas da água.”

Desta primeira análise conclui-se que o equacionamento do aspecto termodinâmico e do cinético do tingimento influencia o desempenho de uma tinturaria, promovendo mais ou menos reprocessos, maior ou menor consumo de insumos e de energia e maior ou menor custo de operação.

Uma tinturaria pode ter uma quantidade elevada ou extremamente baixa de reprocessos a depender do estado da arte em que esta se encontra e também dependendo do grau de exigência de reprodutibilidade de seu produto na aplicação, ou ainda, de acordo com os requisitos de seus clientes. Logo, a busca de melhorias e o uso de um indicador relacionado ao tingimento certo da primeira vez, são fundamentais para a obtenção da qualidade do produto e serviço assim como do menor custo possível de operação. (SALEM, 2008).

Cuidados com a precisão das medições e pesagens, utilizando-se equipamentos automáticos de dosagem e pesagem de corantes, controles nas matérias primas e produtos químicos, programas de manutenção preventiva e limpeza dos equipamentos, utilização de softwares instrumentais de colorimetria e de formulação de receitas, dentre outros, são relevantes para a reprodutibilidade, porém a termodinâmica e da cinética, muitas vezes não consideradas nos estudos de melhoria, constituem os principais fatores da uniformidade da cor ou igualização e da obtenção dos graus de solidez requeridos. Desta forma, controles de temperatura e tempo dos

processos devem ser, não apenas controlados, mas também bem determinados. Processos demasiadamente acelerados não permitem o tempo requerido para que as quatro fases do tingimento (migração, adsorção, difusão e fixação) ocorram de forma a garantir um rendimento desejável. (SALEM, 2008).

É importante considerar que o sucesso de cada fase do tingimento depende totalmente do sucesso da fase anterior. Não existe a menor possibilidade de se obter uma boa difusão do corante se a velocidade de montagem foi muito elevada. Também não se obtém uma boa fixação se houve uma deposição muito superficial do corante sobre o material têxtil. (SALEM, 2008).

Um fator relevante é a consideração de que cada corante apresenta uma curva de montagem (migração) diferente da outra. Diferença esta mais ou menos acentuada a depender da classe de corante e mesmo entre corantes de uma única classe química. Os tingimentos ocorrem normalmente a partir de três corantes diferentes, combinação também conhecida como tricromia, e os fabricantes de corantes costumam indicar as melhores combinações. Da mesma forma, a definição correta dos parâmetros de temperaturas e tempos dos processos interfere fortemente na igualização do resultado do tingimento. (SALEM, 2008).

Nos reprocessos (tanto remontagens como descarregamentos de corante), a incerteza de um resultado satisfatório aumenta. Não é possível se obter uma receita de reprocesso totalmente padronizada. Desta forma, retrabalhos, sempre que possível, devem ser evitados. Técnicos de tinturaria sabem disto e preferem, por vezes, arriscar um resultado no limite de aprovação do que correr o risco de piorar um determinado resultado, seja de reprodutibilidade de cor, igualização da cor ou solidez da cor. Muitas vezes não são calculados ou até mesmo considerados os sobrecustos destes retingimentos, que envolvem insumos e energia. A ocupação de máquinas com retrabalhos, afeta o fluxo produtivo e o serviço por consequência.

5.2.2 A visão econômica na tecnologia de uma tinturaria

O consumo de vapor por quilo de material têxtil tingido varia de acordo com a matéria prima que constitui este material a ser tinto. Varia também com a tecnologia do equipamento e do processo químico.

Nesse sentido, uma abordagem relevante está relacionada ao consumo de água durante o tingimento. O parâmetro conhecido como relação de banho se refere ao volume de banho da máquina por quilo de material processado, lembrando que um tingimento requer vários banhos: de preparação, de tingimento propriamente dito e de lavagens intermediárias e finais.

Uma maior relação de banho permite um maior tempo de migração do corante do banho para a fibra, e com isso, uma melhor igualização da cor, o que equivale a dizer, uma melhor distribuição do corante sobre o material. (TROTMAN, 1984).

Uma relação de banho varia desde 5:1 (5 litros de banho para cada quilo de material) até 20:1 (20 litros de banho para cada quilo de material), a depender da constituição da máquina e da apresentação do material a ser tingido. (TROTMAN, 1984).

Um maior volume de água se traduz em maior consumo de vapor para que a água atinja a temperatura desejada. Desta forma, os fabricantes de máquinas e de produtos químicos, têm apresentado novas opções de tingimento com baixas relações de banho, por vezes menores do que 5:1, sem afetar a igualização ou o resultado de fixação do corante, que se traduz numa boa solidez. A Figura 7 mostra o princípio de uma máquina de tingimento de tecidos e malhas com uma relação de banho da ordem de 3:1 a 4:1:

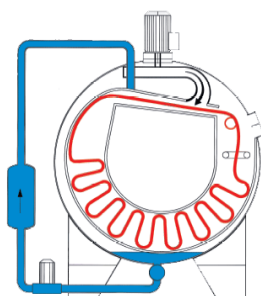


Figura 7: Princípio da máquina Venture da Alliance Machines Textiles com relação de banho menor do que 4:1.

Fonte: catálogo Alliance Machines Textile, 2012.

Uma autoclave de tingimento perde calor por condução nas paredes metálicas. A aplicação superficial externa de uma resina epóxi e um nano-material de baixíssima condutividade permite, além de uma diminuição de exposição de irradiação na tinturaria, uma economia de vapor da ordem de 10 a 25%, de acordo com as informações da empresa fabricante destas resinas, a Nansulate (2012). Um estudo realizado numa tinturaria será apresentado ainda neste trabalho.

A forma integral da Equação de transferência de calor por condução é dada pela Equação 10.

$$\Delta Q/\Delta t = -k.A.(\Delta T/\Delta x) \quad (10)$$

onde $\Delta Q/\Delta t$ representa a perda de fluxo de calor entre a parte interna externa do recipiente; k é a condutividade térmica do material, A é a superfície do material sujeita à perda de calor, ΔT a diferença de temperatura interna e externa e Δx a espessura do material. Isto significa que aplicação de camadas mais grossas de resina reduz a perda de calor por condução. A limitação é dada pelo custo da aplicação e pela durabilidade. Camadas muito espessas tendem a causar mais fissuras da resina em função do tempo. A Figura 8 auxilia o entendimento da Equação.

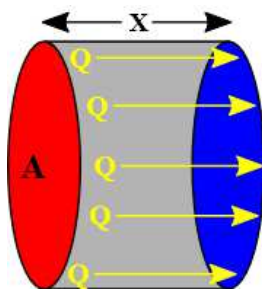


Figura 8: Esquema da transmissão de calor por condução em um material com condutividade térmica k . Fonte:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Condu%C3%A7%C3%A3o_t%C3%A9rmica.

A aplicação pode ser demonstrada num simples ensaio em chaleira, conforme demonstrado nas Figuras 9a e 9b, realizado pela Coats EUA em agosto de 2012.



Figura 9a e 9b: Ensaio com aplicação da resina Nansulate EPX como demonstração da economia de vapor. Fonte: Relatório Coats EUA, 2012.

A temperatura, nas duas condições, foi registrada a cada 6 segundos, partindo-se de 86,5°C até 36,5°C. A Figura 10 mostra a queda de temperatura efetuada em 3 ensaios.

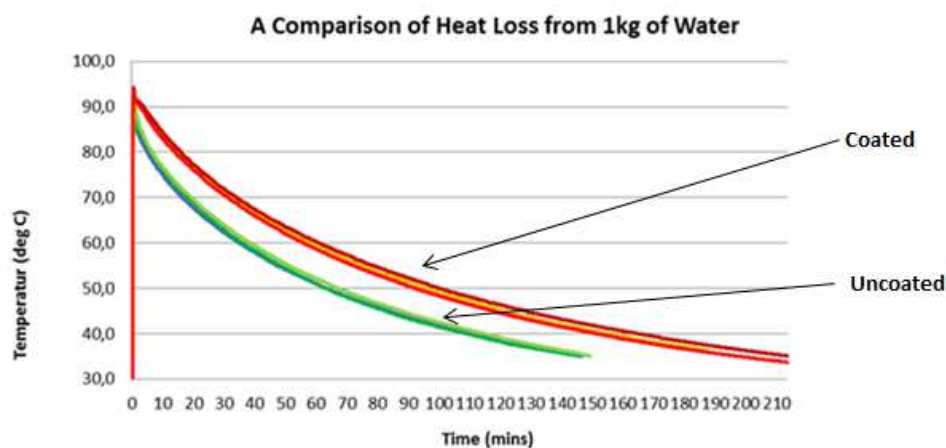


Figura 10: Resultados de queda de temperatura em graus Celsius no ensaio da chaleira com aplicação da resina (Coated) e sem aplicação da resina (Uncoated) em função do tempo em minutos. Tradução do título: Uma comparação da perda de calor de 1 kg de água. Fonte: Relatório Coats EUA, 2012.

O papel da resina epóxi é dar resistência mecânica ao produto. A aparência granulométrica da resina deve-se à porosidade desta e é fundamental para a manutenção da baixa condutividade térmica. A Figura 11 mostra a aparência granulométrica do produto durante o preparo.



Figura 11: Aparência de grãos da resina devido a porosidade confere a baixa condutividade térmica. Fonte: Relatório Nansulate, 2012.

O preparo compreende a adição dos dois produtos e a aplicação deve ocorrer em menos de duas horas, com o uso de um pulverizador. A Figura 12 mostra a aparência do produto após duas horas do preparo, quando não é mais possível sua utilização. (Relatório Nansulate, 2012).



Figura 12: Aparência da resina após 2 h da mistura dos dois componentes. Fonte: Relatório Nansulate, 2012.

A aplicação pode ser a frio, à temperatura morna (40 a 99°C) ou a quente (100 a 170°C). A diferença reside no tempo de secagem que ocorre entre 24 e 48h a depender da temperatura aplicada. (Relatório Nansulate, 2012).

5.3 Aproveitamento dos gases de exaustão – conceito e vantagens

O pH do efluente de uma tinturaria de fibras celulósicas tende a ser elevado e requerer neutralização. Tanto o processo de mercerização, o qual nem sempre existente numa tinturaria, como o processo de purga (ou lixiviação), alvejamento ou ainda tingimentos reativos e à tina, requerem meios fortemente alcalinos. O pH final de um efluente pode atingir valores de 12 a 13.

O objetivo neste estudo é mostrar a viabilidade de se aproveitar os gases de exaustão, ricos em dióxido de carbono, para a neutralização do efluente. Existem algumas tecnologias disponíveis no mercado. De forma geral, objetiva-se a distribuição uniforme do gás na água a ser neutralizada. (ASTI, 2012).

O esquema representado na Figura 13 mostra um exemplo de sucesso da empresa Tavex Corporation na neutralização, e consequente redução de emissão do gás carbônico na atmosfera. O compressor apresenta um esfriamento acoplado.

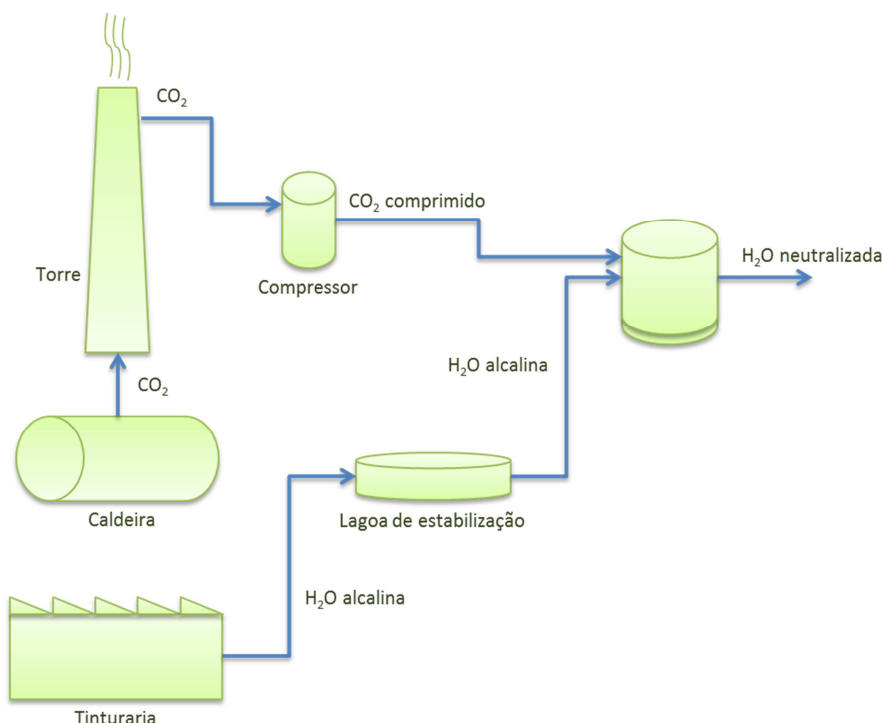


Figura 13: Esquema de aproveitamento do CO₂ para neutralização do efluente alcalino da empresa Tavex Corporation. Fonte: <http://gcc.redein.org/sites/default/files/attachments/10/Case%20Tavex.pdf>.

Além da redução de consumo de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, agente causador de efeito estufa e, portanto, poluente global, o uso do gás de exaustão apresenta outras vantagens: eliminação do uso de ácidos fortes como o sulfúrico ou clorídrico, ambos corrosivos e tóxicos; eliminação do custo do agente de neutralização e facilidade no controle do pH, evitando acidez excessiva, uma vez que o ácido carbônico formado da reação do dióxido de carbono com a água é considerado um ácido fraco. (ASTI, 2012).

As reações envolvidas no processo de neutralização estão representadas nas equações 11, 12 e 13.





A Equação 12 ocorre num primeiro momento, quando o valor de pH é superior a 11,8. Para valores de pH compreendidos entre 8,3 e 11,8 ocorre a Equação 13. O pH abaixo de 8,3 promove um aumento da quantidade de dióxido de carbono livre.

6 Estudo de Caso

6.1 Definição dos focos de trabalho e dos indicadores.

O estudo apresentado neste capítulo corresponde a um caso de uma tinturaria de uma indústria multinacional têxtil de grande porte localizada na cidade de São Paulo que visa à economia de gás natural. A decisão de se dividir o trabalho de melhoria em duas partes, uma relacionada à caldeira e outra à tinturaria, teve como motivação duas questões: a especificidade de cada área, e, portanto, da equipe profissional envolvida, e a complexidade de ambos os temas.

A equipe envolvida na busca de eficiência da caldeira sentiu, de imediato, a necessidade de se escolher um novo indicador visto que aquele utilizado até então, definia o consumo em metros cúbicos consumidos de gás natural por quilograma de material produzido na tinturaria (ou despachado desta). Como existe um determinado percentual de retrabalho na tinturaria, e este flutua de acordo com as dificuldades e as soluções que aparecem, decidiu-se adotar como indicador de consumo a quantidade em metros cúbicos consumidos de gás natural por quilograma de material processado na tinturaria. Entenda-se como processado, o material produzido, e, portanto despachado, acrescido do volume retrabalhado, mas também secagem, mercerização e lubrificação em banho de lotes grandes. Desta forma, é possível desvincular a interferência do retrabalho no indicado de consumo de gás natural.

A fábrica conta com duas caldeiras, uma atualmente em operação e outra, mais antiga, mantida como reserva quando há manutenção. As especificações gerais são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Especificações gerais das duas caldeiras disponíveis para a tinturaria. Fonte: elaboração do autor.

Caldeira	Nova	Antiga
Marca	Aalborg Industries S/A	ATA Combustão Técnica S/A
Modelo	Mission 3 Pass - 15	MP 815
Categoria	B	B
Ano de fabricação	2002	1981
Produção de vapor [kg/h] a 20°C	15000	15000
Produção de vapor [kg/h] a 40°C	15480	não informada
Combustível	gás natural	óleo convertida para gás natural

O volume médio processado na tinturaria em 2011, antes das ações de melhoria, foi de 395.867 kg/mês. O consumo médio de gás natural, neste mesmo período, foi de 293.937 m³/mês, o equivalente a 3.213.361 kWh/mês. Os índices médios de consumo de gás natural por volume processado resultam, portanto, em 0,74 m³/kg, ou ainda, 8,12 kWh/kg.

A distribuição destes volumes e índices durante o ano 2011 está representada graficamente nas Figuras 14 e 15.

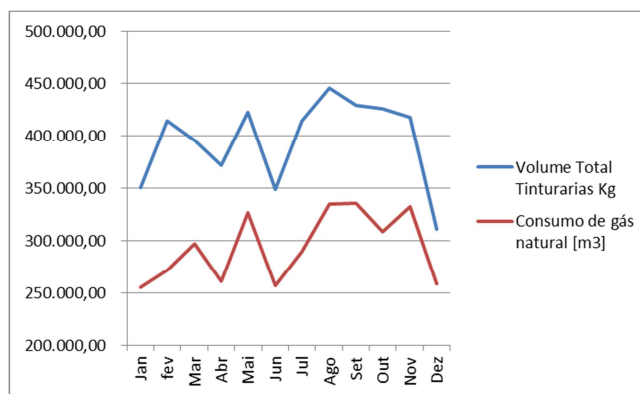


Figura 14: Volumes mensais de material processado e de gás natural consumido em 2011. Fonte: elaboração do autor.

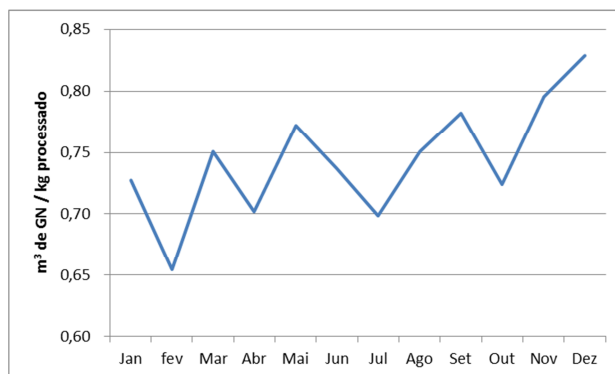


Figura 15: Índice mensal de consumo de gás natural em 2011. Fonte: elaboração do autor.

O comportamento observado em zig-zag explica-se pela tendência de se usar ambas as caldeiras com trocas a cada 15 a 20 dias. Este procedimento objetivava a garantia de funcionamento de ambas. A tendência de crescimento no ano se explica por uma maior tendência no uso da caldeira antiga, na qual o consumo era maior. O projeto de automação da caldeira mais nova, desde seu início, exigiu maior tempo sem uso.

As Tabelas 8 e 9 representam respectivamente a quantidade de máquinas de tingir e de secar. O número médio de lotes produzidos em 2012 até o mês de setembro é de 477,8 lotes/dia.

Tabela 8: Quantidade de máquinas instaladas de tingir por capacidade produtiva. Fonte: elaboração do autor.

Quantidade de máquinas	Capacidade [kg]
8	2 a 4
8	4 / 6 / 8
8	5 a 10
5	10
2	12
0	12 / 16
1	18
7	18/24/30/36
1	40
3	48 / 60 / 72
8	36/54/72/90
4	144
1	168
3	378
1	496
1	992
4	3
1	12
2	30
2	70
2	200
1	70

Tabela 9: Quantidade de secadoras. Autor: elaboração do autor.

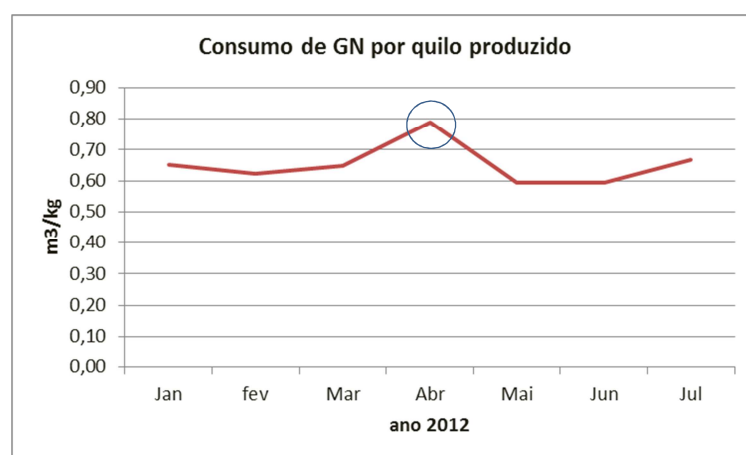
Quantidade de secadoras	Tipo de secadoras
5	Ar quente aquecido por vapor para lotes grandes. Processo por bateelada.
4	Frequência de rádio destinadas preferencialmente a lotes médios e pequenos. Não utiliza vapor. Duas secadoras em processo contínuo e duas por batelada.

6.2 As propostas de melhorias

Quanto ao time focado na eficiência da caldeira, as ações propostas e implementadas foram:

- Uso apenas da caldeira de maior eficiência, exceto em período de manutenção:
a quantificação da economia foi determinada a partir do consumo de gás natural das duas caldeiras. O período de manutenção da caldeira nova, que ocorreu no mês de abril de 2012, evidenciou um consumo maior da caldeira antiga, de acordo com a Figura 16. No ano de 2012 as ações de melhoria da caldeira nova e da instalação já estavam praticamente concluídas.

Como a tinturaria trabalha com lotes por bateladas e as cores seguem a moda, não é possível parar a produção para manutenção da caldeira, o que justifica a permanência de uma segunda caldeira.



- Automação do painel de comando da nova caldeira com ajuste e afinação do controle de chama dos queimadores: as melhorias foram efetuadas ao longo de três meses de desenvolvimento e a um custo total de R\$ 99.230,00. O retorno (*pay back*) foi estimado em 2,37 anos:

- a) 01 Lança de gás natural, modelo QG-M3P, conforme padrão Aalborg;
- b) 01 Medidor de vazão de gás, tipo Vortex, com sinal 4-20 mA;
- c) 01 Medidor de vazão de vapor, tipo Vortex, com sinal 4-20 mA;
- d) 01 Medidor de vazão de água, tipo eletromagnético, com sinal 4-20 mA;
- e) 01 Sistema destinado ao Controle de Carga e Nível contínuo a 01 elemento, compreendendo:
 - 01 Transdutor de pressão manométrica do vapor produzido, sinal de 4-20 mA;
 - 01 Pressostato de alta no ar de combustão para confirmação de pré-purga na fornalha da caldeira;
 - 01 Servo motor, sinal 4-20 mA, para controle da vazão de gás natural;
 - 01 Válvula borboleta para modulação da vazão de gás natural;
 - 01 Painel de comando auxiliar, conforme padrão Aalborg, compreendendo:
 - 01 Micro PLC Twido e IHM 3/8", marca Schneider;
 - 01 Inversor de frequência, marca Schneider para os motores das bombas de água;
 - 01 Inversor de frequência, marca Schneider, para o motor do ventilador;
 - 01 Fonte de alimentação;
 - Ventilação forçada;
 - Contatores auxiliares, disjuntor para comando, bornes, cabos e demais componentes necessários.

O inversor de frequência foi destinado ao motor do ventilador da caldeira. O ventilador passou a ser controlado pelo PLC em conjunto com outros acessórios do controle de carga da caldeira, com as seguintes melhorias:

- a) Ajuste fino do sistema de combustão com curva pré-estabelecida pelo PLC evitando excesso de ar em carga baixa e reduzindo o consumo de combustível (estimado em 1,5 a 2%);
- b) Redução do consumo de energia elétrica do motor do ventilador entre 30% a 40%, dependendo da carga de operação da caldeira.

A lança fornecida com bicos móveis especiais para queima de gás natural proporciona melhor mistura de ar/gás, aumentando a eficiência da queima.

A eficiência da caldeira numa tinturaria depende fortemente de um controle automático das vazões de gás e ar. Isto porque a demanda de vapor varia consideravelmente.

- Reposição do material de isolamento térmica da tubulação de vapor em toda a fábrica: esta ação foi a última tomada pelo time. O material utilizado foi a lã de vidro. Conforme a Figura 17 evidencia, a reposição envolveu 250 m e custou R\$ 18.300,00.

S.	Itm	C	I	Material	Texto breve	Qtd...	U...	T	Dat.remessa	Preço liq.	Moe...	por	U...	Grp.marca
10	K			OUIS-OTHER	MATERIAL DE ISOLAMENTO TÉRMICO (250 M)	1	CDA	D	23.05.2012	18.300,00	BRL	1	CDA	Services

Figura 17: Documento de compra de 250 m de material de isolamento da tubulação de vapor. Fonte: cópia do pedido eletrônico de compra.

O time responsável pela eficiência na tinturaria adotou o seguinte plano de ações:

- Busca da melhoria da reprodutibilidade das cores, de forma a minimizar retrabalhos: o software que gerencia o sistema colorimétrico da tinturaria permite a transferência dos resultados de todos os lotes para o aplicativo Excel, no qual os dados foram transformados em informações gerenciáveis, a partir do uso da tabela dinâmica. A prioridade da análise das receitas ocorreu a partir de cores de alta demanda. O período dos dados coletados foi de quatro meses. Os resultados instrumentais de cor foram analisados por título (densidade linear) dos fios. As correções ocorreram em laboratório. Em paralelo, foram feitos estudos de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) no laboratório e entre as máquinas do laboratório e da produção.

Tabela 10: Parte da tabela referente à priorização das cores de alta frequência para busca de melhoria das receitas. Fonte: elaboração do autor.

Cor	Frequência absoluta	Priorização
Y5860	62	1
Y79I	60	2
Y6159I	58	3
B297CRU	57	4
Y272	56	5
Y6165	54	6
YC7929	54	7
GCRC2324	53	8
Y206	52	9
Y225I	51	10
YC8671	51	11
Y111	47	12
Y616	45	13
Y5471	44	14
Y4968	43	15
Y263I	42	16
Y350	42	17
Y978	41	18
Y274	40	19
YW8181	40	20

A Tabela 11 mostra alguns exemplos de análise de quais cores de um artigo de composição mista (algodão e poliéster), considerando fios de títulos diferentes, devem ter suas receitas melhoradas, com base na diferença de cor instrumental (ΔE) no sistema CIELab de 0,8. Este valor já é considerado crítico, difícil de ser atingido. A análise compreende as seguintes etapas:

- A tabela já está priorizando cores de maior demanda, porém a análise também considera a demanda por título (número de lotes por título).
- A escolha das cores a serem reformuladas ocorre para percentuais de lotes com ΔE até 0,8 abaixo de 50% (bolinhas vermelhas e pretas, com priorização das pretas, cujo percentual está abaixo de 25%).
- Combinações de cores e títulos com bolinha verde servem de referência para melhoria das receitas das demais. O ajuste é pequeno, mas sempre ocorre por duas razões: a composição algodão / poliéster depende do título e, o tingimento nunca ocorre em todo volume da secção transversal do fio. O corante tende a se concentrar mais perto da superfície do que na parte interna do fio.

Tabela 11: Parte da tabela dos critérios para melhoria da receita. Fonte: elaboração do autor.

Cor	Títulos [dtx]	Número de lotes com ΔE até 0,8	Número de lotes com ΔE maior que 0,8	Número de lotes por título	Porcentagem de lotes com ΔE até 0,8	Número de lotes tingidos por cor
Y79I	123x3	10	11	21	48%	60
	200x2 e 200x3	3	4	7	43%	
	230x2 e 230x3	0	0	0	-	
	400x2 e 400x3	20	12	32	63%	
	490x2 e 490x3	0	0	0	-	
Y5860	123x3	4	2	6	67%	59
	200x2 e 200x3	8	11	19	42%	
	230x2 e 230x3	1	0	1	100%	
	400x2 e 400x3	15	14	29	52%	
	490x2 e 490x3	2	2	4	50%	
Y6159I	123x3	0	1	1	0%	56
	200x2 e 200x3	10	1	11	91%	
	230x2 e 230x3	0	1	1	0%	
	400x2 e 400x3	3	3	6	50%	
	490x2 e 490x3	15	22	37	41%	
16	123x3	1	1	2	50%	56
	200x2 e 200x3	16	20	36	44%	
	230x2 e 230x3	1	0	1	100%	
	400x2 e 400x3	0	3	3	0%	
	490x2 e 490x3	1	13	14	7%	
Y6165	123x3	2	2	4	50%	54
	200x2 e 200x3	6	6	12	50%	
	230x2 e 230x3	1	0	1	100%	
	400x2 e 400x3	18	6	24	75%	
	490x2 e 490x3	10	3	13	77%	

- Revisão dos métodos de tingimento com foco em economia de água e energia sem afetar os parâmetros de qualidade: através de benchmarking com outras unidades do mesmo grupo têxtil presentes em quase 60 países e com a ajuda dos fornecedores de corantes e produtos auxiliares.

A ação mais impactante neste sentido foi a possibilidade de se reduzir uma lavagem a quente de 20 min em cores intensas de poliéster a partir da busca de uma redução na velocidade de montagem do corante, reduzindo a temperatura e aumentando o tempo de migração do corante para a fibra. Em paralelo, foi feita uma redução da quantidade de igualizante Eganal PS de 1g/l para 0,5g/l. Segundo os técnicos da Clariant (fornecedora de corantes e produtos químicos auxiliares ao tingimento), cores mais intensas não requerem tanto igualizante, e este acaba por competir com o corante, dificultando a montagem na fibra;

- Aplicação superficial externa de uma resina epóxi e um nano-material de baixíssima condutividade: a aplicação por máquina apresenta um custo elevado e a validade ou durabilidade é de aproximadamente dois anos. Desta forma, existe uma programação mensal para aplicação e reaplicação da resina. A Figura 18a mostra uma máquina de tingimento de bobina cruzada sem

aplicação da resina. A Figura 18b mostra uma terceira máquina com a resina aplicada há menos de quatro meses. A Figura 18c mostra uma máquina com aplicação danificada pela ação térmica em função do tempo. O nível de economia que este processo proporciona é de difícil mensuração. Uma forma de medir é a partir das perdas de temperatura superficial da máquina.



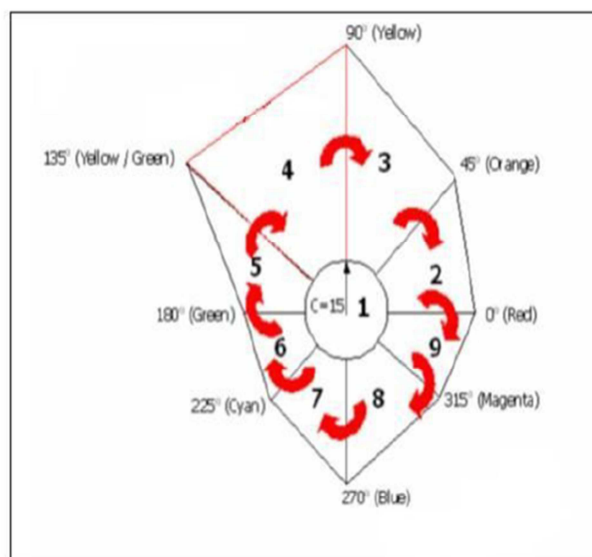
Figura 18a e 18b: Máquinas sem e com a aplicação da resina. Fonte: fotos do autor.



Figura 18c: Máquina com a resina danificada, requerendo manutenção da aplicação. Fonte: fotos do autor.

- Redução do número de lavagens de máquinas através da otimização da sequência de tingimentos que partem de cores claras até escuras: numa tinturaria, um pouco de fila de lotes é requerida a fim de alocar uma cor clara, imediatamente após a lavagem, seguida de uma cor mais intensa, e de matiz próximo, e assim por diante, até o tingimento de uma cor escura. Somente após este tingimento, a máquina passa por um processo de lavagem. Embora este método seja conhecido em tinturarias, a otimização ocorreu a partir da análise dos resultados das sequências das filas. As Figuras 19 e 20 mostram um exemplo de sequências possíveis de tingimento numa mesma máquina, com

mudanças de tom num mesmo patamar de intensidades de cor e mudança sequente de intensidade de cor. Cada gráfico destes representa uma faixa de intensidade de cor. A escolha de mudança de matiz no sentido horário foi estabelecida aleatoriamente, porém uma vez determinado o sentido, este deve ser sempre mantido. Saltos de tonalidade num mesmo nível de intensidade de cor não são permitidos.



3-2-9-8-7-6-5-4

Figura 19: Sequência de tonalidade permitida num mesmo nível de intensidades de cor antes de uma lavagem de máquina. Fonte: procedimento interno da tinturaria.

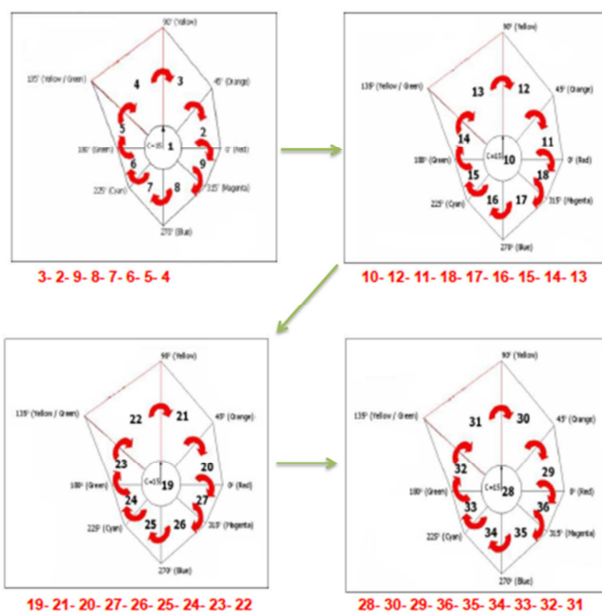


Figura 20: Sequência de níveis de intensidades, onde se pode partir de qualquer tonalidade. Fonte: procedimento interno da tinturaria.

A Figura 21 mostra a relação entre lavagens e lotes tingidos e sua linha de tendência. Análises por grupo de máquinas ou por máquina é requerida perante pioras, conforme evidenciado na Figura 22.

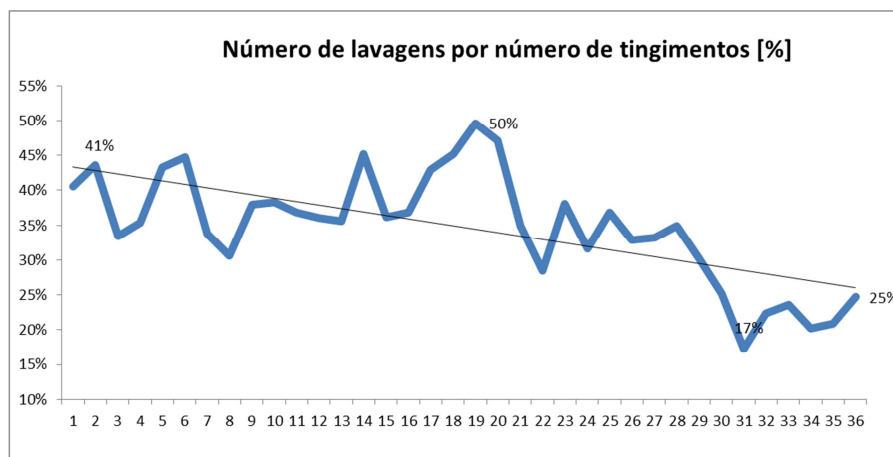


Figura 21: Relação entre lavagens e tingimentos produzidos ao longo do tempo (semanas do ano). Fonte: elaboração do autor.

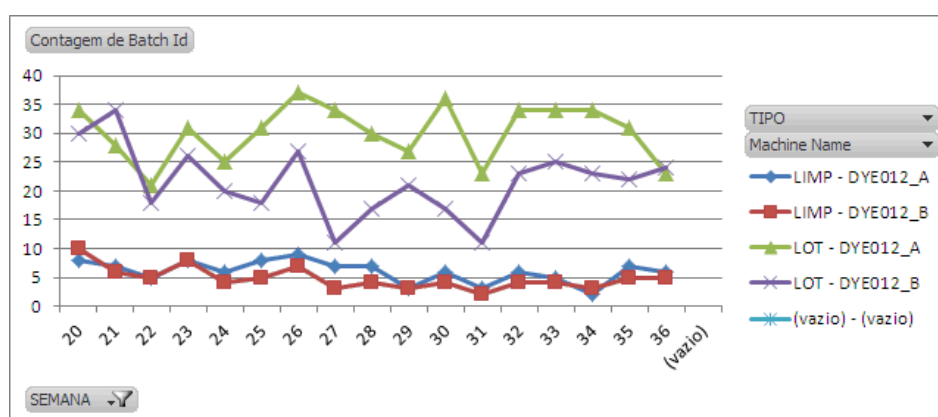


Figura 22: Número de tingimentos e número de lavagens de duas máquinas de tingimento em função do tempo (semanas do ano). LIMP significa limpeza, LOT significa lotes, DYE012_A e DYE012_B são duas máquinas de tingimento da mesma família. Fonte: relatório interno da tinturaria.

O sistema eletrônico ou não de gerenciamento da tinturaria afeta o resultado, segundo a possibilidade de uma maior ou menor visualização dos pedidos pendentes. Neste caso espera-se ainda uma melhoria por conta da entrada do Sistema Aplicativo e Produtos (SAP) que deverá iniciar sua atividade a partir do mês de novembro deste ano. Este gerenciador permite uma visualização e liberdade de ação das ordens significativamente maior do que com o aplicativo atual.

Outras melhorias que afetam a reprodutibilidade foram consideradas em anos anteriores como a padronização e controle da densidade das rocas para evitar a fuga de banho entre rocas durante o tingimento, o controle de temperatura e de umidade da sala de pesagens, pois os corantes são sujeitos a variações de peso por conta da umidade, padronização das pressões das autoclaves e, por último, instalação de um equipamento para preparação de soluções e dosagem e pesagem de corantes que opera de forma totalmente automática.

A Figura 23a mostra um equipamento da JAKing para medição de densidade de rocas. As Figuras 23b e 23c mostram respectivamente o equipamento Lawer para preparação de soluções de corantes e para dosagem e pesagem de soluções de corantes, todos instalados na tinturaria em estudo.



Figuras 23a: Equipamento JAKing para medição de densidade das rocas a partir da massa e do diâmetro de enrolamento; 23b: máquina Lawer preparadora de soluções de corantes; 23c: máquina Lawer dosadora e pesadora de soluções de corantes. Fonte: fotos do autor.

6.3 Aproveitamento dos gases de exaustão

O efluente antes da neutralização apresenta um pH que varia entre 12,5 e 13,0. Esta alcalinidade se explica pelos principais processos químicos que o algodão passa: mercerização, alvejamento e tingimento. Todos ocorrem em meios fortemente alcalinos, especialmente a mercerização, onde a concentração do banho de soda cáustica é de 22% em peso. Ainda que o banho deste processo seja aproveitado em lavagens posteriores, o resíduo final é fortemente alcalino.

O volume de efluente final, com base no monitoramento *on line* da Sabesp, é de aproximadamente 72000 m³/mês para ajuste do pH para 9,5 a 9,8. A tinturaria até 2011 comprava o dióxido de carbono para neutralização do efluente. Hoje, a neutralização ocorre em dois reatores que trabalham em paralelo e o pH resulta entre 8,0 e 9,0 e a quantidade de CO₂ que sai da caldeira excede em muito a quantidade necessária para a neutralização do efluente. As Figuras 24a, 24b e 24c mostram respectivamente a tubulação de saída da chaminé da caldeira, as bombas com refrigeração dos gases de exaustão acoplada, localizadas logo após a saída e os reatores de neutralização. O gás deixa a caldeira a aproximadamente 190°C, chega na bomba a 60°C, devido à refrigeração e chega a pouco mais de 40°C nos reatores. A reação que é do tipo ácido fraco e base forte ocorre em temperatura ambiente.



Figuras 24a: Tubulação do desvio de saída dos gases da caldeira; 24b: duas bombas com refrigeração acoplada, localizadas logo após as tubulações de desvio do gás; 24c: reatores de neutralização. Fonte: fotos do autor.

Medições dos gases na saída dos reatores são feitas periodicamente e são consideradas juntamente com as medições de saída da chaminé da caldeira. O último relatório emitido em julho de 2012 pode se visto na Figura 25.

TABELA 4 - SAÍDA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO (ETE)

RESULTADOS PARA GASES DE COMBUSTÃO

CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE GASOSO		
Nº da Coleta	Coleta Única	
Data da Coleta	23/07/2012	
Horário de Início (h)	16:15	
Horário de Término (h)	16:45	
Temperatura dos Gases (°C)	42,1	
Umidade dos Gases (% vol.)	12,96	
Velocidade dos Gases (m/s)	2,41	
Vazão na condição da chaminé (m³/h)	1.704,7	
Vazão na CNTP, base seca (Nm³/h)	1.178,1	
Gases de Combustão (% vol.)	Oxigênio (O ₂)	5,6
	Dióxido de Carbono (CO ₂)	8,8
	Monóxido de Carbono (CO)	0,0
RESULTADOS OBTIDOS		
Oxigênio (O ₂)	Teor (% vol)	4,88
	Concentração (mg/Nm³) ^(a)	69,643
	Taxa de Emissão (kg/h)	82,05
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Teor (% vol)	9,25
	Concentração (mg/Nm³) ^(a)	181,696
	Taxa de Emissão (kg/h)	214,06
Monóxido de Carbono (CO)	Teor (ppm)	4,50
	Concentração (mg/Nm³) ^(a)	5,63
	Taxa de Emissão (kg/h)	0,01

Figura 25: Controle dos gases de saída dos reatores de neutralização. Fonte: relatório ambiental Ecosamplung de julho de 2012.

7 Resultados

O resultado global de todas as ações sobre a caldeira e com a aplicação da resina nas máquinas de tingir pode ser visto em termos de consumo de gás natural por volume processado, de acordo com o gráfico da Figura 26, em forma de *boxplot*, considerando-se a mediana ao invés da média, uma vez que o resultado do mês de abril deve ser considerado uma exceção, lembrando que neste período foi usada a caldeira reserva, situação para a qual as melhorias não foram consideradas. O ponto isolado no *boxplot* de 2012 representa exatamente o uso da caldeira secundária.

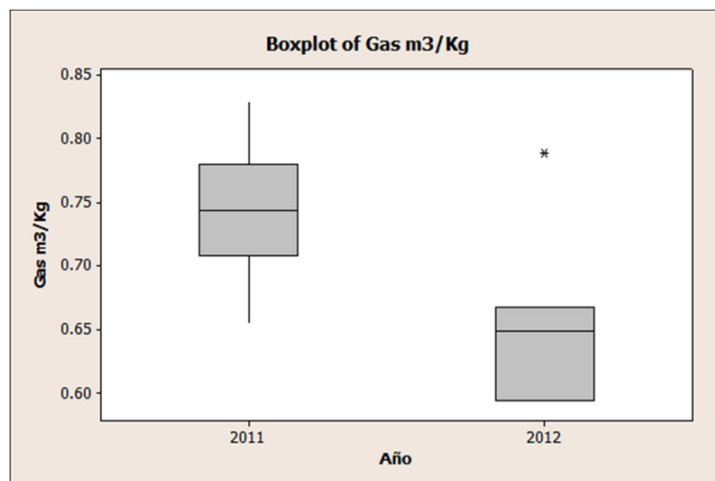


Figura 26: Evidência da redução de consumo de gás natural. Fonte: elaboração do time de trabalho no projeto de melhoria.

As Figuras 14 (referente ao período de 2011) e 15 (referente ao período de 2012) também mostram uma tendência de maior regularidade em 2012, por conta do uso de apenas uma caldeira, a de maior eficiência. A Figura 27 representa a economia mensal em US\$ com base na média mensal de 2011.

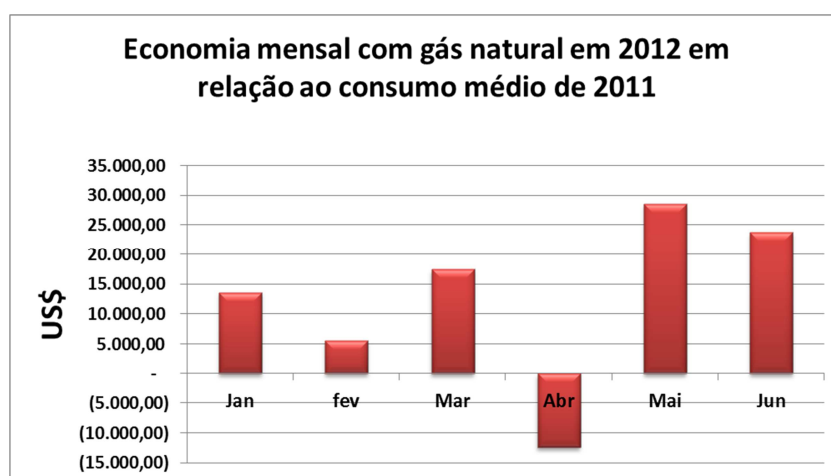


Figura 27: Economia de gás natural mensal em US\$. Fonte: elaboração do autor.

A redução efetiva de consumo de vapor no processo de tingimento requer um tempo maior e uma melhoria efetiva está prevista para julho de 2013. Isto porque o número de cores, e, portanto de receitas, envolvidas nas melhorias passa de três mil. Além disso, a reprodutibilidade de uma cor depende da uniformidade das condições das máquinas. Diferenças entre pressões e relações de banho não permitem a análise correta e melhoria das receitas. Ainda assim, é possível observar os primeiros

resultados quantitativos de redução de retrabalhos na Figura 28. O right first time (RFT) representa o percentual de lotes aprovados sem necessidade de reprocessos. O percentual de lotes com diferença instrumental de cor (DE) até 0,8 representa com qual reprodutibilidade em relação ao padrão de cor, os lotes estão saindo sem reprocesso algum. O terceiro componente, colour performance index (CPI) é resultado dos dois índices anteriores, e tem por objetivo garantir a melhoria de ambos simultaneamente. O RFT depende de outros dois fatores além da reprodutibilidade: do resultado de solidez da cor e igualização do tingimento.

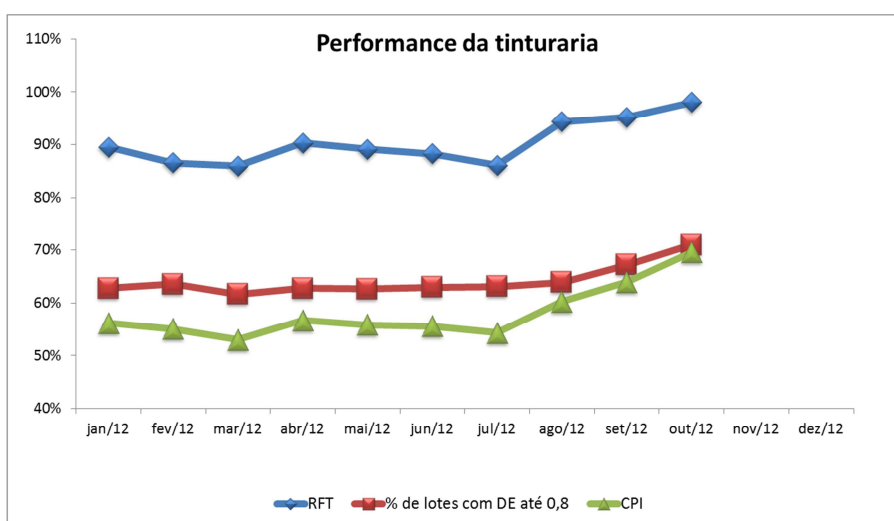


Figura 28: Melhoria de eficiência na tinturaria. Fonte: elaboração do autor.

A análise da Figura 21, apresentada anteriormente, mostra uma redução no número de lavagens entre tingimentos.

É importante destacar que as ações relacionadas a melhorias de receitas e redução do número de lavagens requerem um monitoramento constante, pois as variáveis que interferem fortemente no resultado. Respectivamente às duas ações comentadas, tem-se como exemplos: lotes de corantes não tem exatamente o mesmo nuance, e uma redução nas filas de entrada, ou urgências podem provocar um aumento do número de lavagens por número de tingimentos.

Desta forma, além de uma redução de consumo de vapor da ordem de 12% como consequências das ações de melhoria na caldeira, estima-se uma redução de consumo da ordem de 8% devida às ações que têm sido implementadas na tinturaria.

Os gráficos das Figuras 29a e 29b representam o consumo e o custo de CO₂ antes da neutralização do efluente a partir dos gases de exaustão da caldeira, onde se vê uma redução quase a zero do consumo em meados de 2011, por conta da instalação do novo sistema.

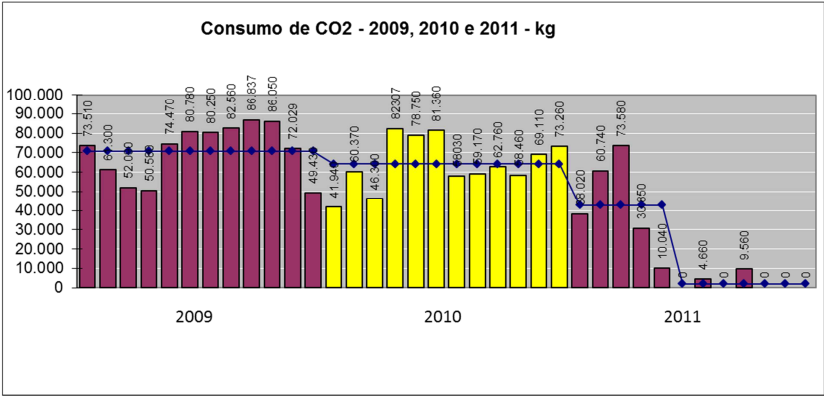


Figura 29a: Consumo de CO₂ comprado antes da neutralização a partir dos gases de exaustão da caldeira. Fonte: elaboração do autor.

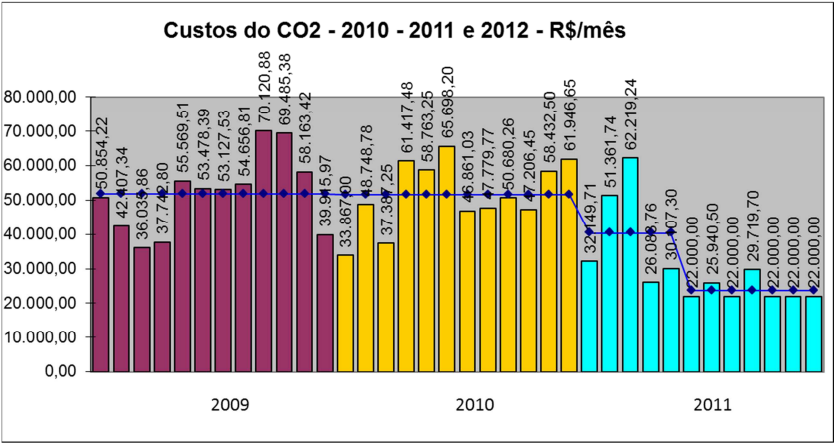


Figura 29b: Custo de CO₂ comprado antes da neutralização a partir dos gases de exaustão da caldeira. Fonte: elaboração do autor.

O custo diminui menos do que o consumo, porque a tinturaria não teve investimentos com o novo sistema. O contrato é de prestação de serviços incluindo equipamentos e manutenção preventiva.

8 Conclusões

Numa visão macro, o trabalho mostra que numa gestão por processo, porém sustentável, não basta uma definição de entradas, saídas e valor agregado. É preciso considerar o consumo de recursos e a geração de impactos, de acordo com a Figura 30.



Figura 30: Visão genérica de processo com foco em sustentabilidade. Fonte: elaboração do autor.

No estudo específico deste trabalho, a Figura 27 passa a ser representada de acordo com a Figura 31.

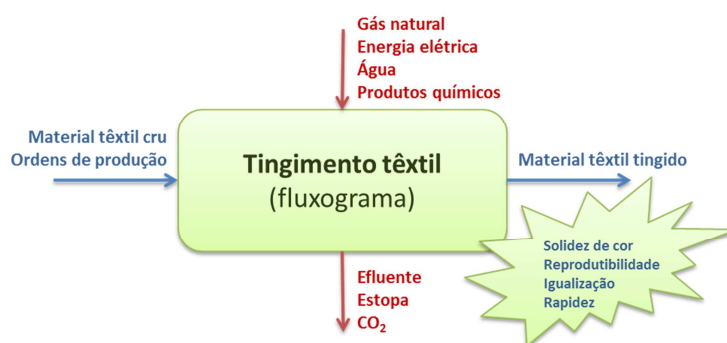


Figura 31: Visão de um tingimento têxtil considerando aspectos de sustentabilidade. Fonte: elaboração do autor.

O recurso considerado neste trabalho foi o gás natural. Como impactos foram considerados o efluente e o dióxido de carbono.

Uma questão importante considerada no trabalho é que os aspectos de qualidade, considerados acima como valores agregados (solidez, reprodutibilidade, igualização e rapidez no atendimento) contribuem para a redução do consumo de recursos e de impactos ambientais. Embora o recurso focado tenha sido o gás natural consumido na

caldeira, é possível e é dever de uma gestão sustentável focar os demais recursos e demais impactos.

Esta gestão deve considerar a complexidade técnica e operacional. Isto ficou evidenciado na separação do trabalho em dois times distintos. Ambos os times contaram com especialistas e com operadores, que conhecem mais detalhadamente as atividades e seus impactos no processo. Também foram necessários recursos externos, seja com produtos ou tecnologia.

É relevante observar que as velocidades tanto dos trabalhos como da obtenção dos resultados são diferentes e estas devem ser estimadas e respeitadas. No caso apresentado, não foi considerada a economia de consumo de gás natural e de vapor por ação tomada. Embora exista uma dificuldade na obtenção deste nível de detalhamento, seria interessante pelo menos a busca de uma estimativa próxima, uma vez que algumas ações requerem manutenção e, portanto, investimento contínuo.

A visão por processo é uma ferramenta prática e relevante para a busca de melhorias. Estas, por sua vez, devem focar competitividade e sustentabilidade, conforme evidenciado no estudo deste caso e de acordo com a Figura 32.

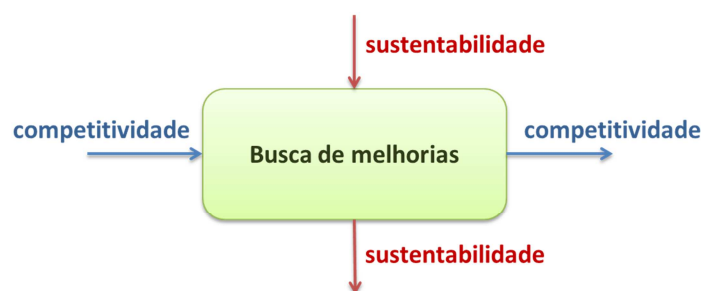


Figura 32: Visão de melhorias. Fonte: elaboração do autor.

Considerando que melhorias nos aspectos de qualidade podem promover melhorias nos aspectos ambientais, pode-se afirmar, como consequência, que há uma interação positiva entre competitividade e sustentabilidade, conforme mostra a Figura 33.



Figura 33: Visão da relação entre competitividade e sustentabilidade. Fonte: elaboração do autor.

Desta forma, se houve um tempo que a vantagem competitiva estava na certificação num sistema de gestão, hoje, esta vantagem só pode ocorrer a partir de um sistema robusto, com foco em melhorias efetivas e mensuráveis, a partir de desenvolvimentos de novos processos, equipamentos, tecnologia e ideias novas.

9 Bibliografia

Aalborg Ind. AS; Manual de Instruções da Caldeira; número de ordem 10385.

Alliance Machine Textile; Catálogo 2012.

ASTI Reprt; Carbon Dioxide for pH Control; 2012.

BEGA, Egídio Alberto; Instrumentação Aplicada a Controle de Caldeiras; Editora Interciência; 3ª edição; 2003.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Ribeiro; Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento; Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2000.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcello; Operação de Caldeiras, Gerenciamento, Controle e Manutenção; Editora Blucher; 1ª edição; 2011.

DECRETO Nº 8.468, de 08 DE SETEMBRO DE 1976 do Governo do Estado de São Paulo.

Estudo de repetitividade e reprodutibilidade de agosto de 2012 da máquina Simplex na Coats Brasil.

FERREIRA, Eloy Alves Filho e CHUI, Queenie Siu Hang; Artigo Técnico - Qualidade de Medições e Neutralização de Efluentes Alcalinos com Dióxido de Carbono; Universidade São Francisco; 2006.

GOULART, Flávio de Ávila; BARBERINO, Nilton Passos; Metodologia e Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Conversão de Caldeiras a Óleo Combustível para Gás Natural; Universidade Federal da Bahia; 2003.

KORETSKY, Milo D.; Termodinâmica para Engenharia Química; Editora LTC; 1ª edição, 2007.

MARTINELLI Jr., Luiz Carlos; Geradores de Vapor; arquivo acessado em 02 de setembro de 2012; www.saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf.

MONTEIRO, Jorge Venâncio de Freitas; DA SILVA, José Roberto Nunes Moreira; Gás Natural Aplicado à Indústria e ao Grande Comércio; Editora Blucher; 1ª edição; 2010.

Norma ABNT NBR ISO 9001:2008 (Sistemas da gestão da qualidade – requisitos).

Norma ABNT NBR ISO 9004:2010 (Gestão para o sucesso de uma organização – Uma abordagem da qualidade).

Relatório Nansulate, 2012.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 20, de 18 de junho de 1986.

SALEM, Vidal; Tingimento Têxtil, Fibras, Conceitos e Tecnologias; Editora Blucher; 1ª edição; 2010.

Tavex do Brasil, Redução de emissões de CO₂ com a neutralização do efluente industrial; 2012.

TROTMAN, E.R.; Dyeing and Chemical Technology of Textile Fibers; Griffin & Co.; 6th edition; 1984.