

Reaproveitamento de Energia Térmica Desperdiçada na Secagem de uma Máquina de Lavar Industrial

Andre Adriano Versteeg e Carlos Roberto Altafini

Resumo

Dentre as etapas do processo de produção de painéis de alumínio com revestimento, os processos de lavagem, secagem e a sinterização do revestimento são as etapas que mais sofrem com perdas térmicas. É de grande importância melhorar as condições desses processos, reduzindo os impactos ambientais decorrentes dessa atividade produtiva. Na etapa de secagem das peças em estufa da máquina de lavar, gases de combustão são lançados na atmosfera por uma chaminé. O processo de recuperação de calor tem o propósito de aproveitar o calor residual dos gases de combustão para aquecer a água utilizada na alimentação do processo de desmineralização com osmose reversa. Esta estratégia possibilita o aproveitamento dos gases quentes lançados na atmosfera. Esse trabalho teve por objetivo desenvolver e instalar um trocador de calor com capacidade para aquecer 4.000 litros de água por hora a uma temperatura de 40 °C. A construção do trocador de calor respeitou os aspectos construtivos da máquina de lavar já existente. Como resultados foram obtidos um aumento de 77,8% de vazão por hora de água desmineralizada e a viabilidade de trabalhar com duas máquinas de lavar em dois turnos. Além disto, a empresa onde o estudo foi realizado percebeu um grande potencial de aproveitamento, principalmente nos muitos fornos disponíveis, onde a energia térmica pode ser usada.

Palavras-chave

Industria 4.0, sustentabilidade, eficiência energética, aquecimento de água.

Reuse of Thermal Energy Wasted on Drying an Industrial Washing Machine

Abstract

Among the stages of the production process of coated aluminum pots, the washing, drying and sintering process of the coating are the stages that suffer most from thermal losses. It is of great importance to improve the conditions of these processes, reducing the environmental impacts resulting from this productive activity. In the drying phase of the parts in the washing machine oven, flue gases are released into the atmosphere by a chimney. The heat recovery process has the purpose of taking advantage of the residual heat from the flue gases to heat water used to feed the demineralization process with reverse osmosis. This strategy enables the use of hot gases released into the atmosphere. This work aimed to develop and install a heat exchanger capable of heating 4,000 liters of water per hour at a temperature of 40 °C. The construction of the heat exchanger respected the constructive aspects of the existing washing machine. As results were obtained, an increase of 77.8% of flow per hour of demineralized water and the feasibility of working with two washing machines in two shifts. In addition, the company where the study was carried out perceived a great potential for use, especially in the many available ovens, where thermal energy can be used.

Keywords

Industry 4.0, sustainability, energy efficiency, water heating.

I. INTRODUÇÃO

A eficiência energética consiste em se obter o melhor desempenho na produção de um produto aliado ao menor gasto de energia possível. Para promover a eficiência energética é necessário analisar o processo produtivo identificando perdas a serem eliminadas ou pontos de reutilização.

A Indústria 4.0 tem no ganho de eficiência energética um de seus principais benefícios. Segundo informações apontadas para o segmento industrial, 42% da energia consumida no setor é desperdiçada em problemas, entre outros, como perda de calor e iluminação insuficiente [1].

Esse trabalho visa estudar a recuperação de energia térmica desperdiçada pelos gases da estufa de secagem de uma máquina de lavar industrial utilizada para a secagem das peças após o processo de lavagem. A energia térmica recuperada foi usada para aquecimento e controle da temperatura da água de alimentação do sistema de desmineralização por osmose reversa. O processo de desmineralização da água funciona com capacidade total de 3 m³/h quando a água está na temperatura de 25 a 30 °C, o que dificilmente ocorre na região da Serra Gaúcha. No inverno com as temperaturas baixas a osmose reversa produz somente em torno de 1,8 m³/h, em torno de 67% da vazão nominal, pois aumenta a densidade da água, dificultando sua permeação nas membranas. Para superar esse problema foi pensado no aproveitamento da energia conduzida pelos gases quentes de combustão da chaminé da estufa da máquina de lavar e, assim, aquecer e controlar a temperatura da água da osmose reversa.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Indústria 4.0

A Indústria 4.0 é considerada uma nova etapa industrial em que processos de fabricação vertical, horizontal, a integração e a conectividade de produtos podem ajudar as empresas a alcançar um desempenho industrial mais alto. Contudo, pouco se sabe sobre como as indústrias veem a contribuição potencial das tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 para desempenho industrial, especialmente em países emergentes [2]. Uma estrutura conceitual é proposta para essas tecnologias, que são divididas em *front-end* e tecnologias básicas. As tecnologias *front-end* consideram quatro dimensões: *Smart Manufacturing*, *Smart Products*, *Smart Supply Chain* e *Smart Working*. Já as tecnologias básicas consideram quatro elementos: internet das coisas, nuvem de serviços, *big data* e *analytics* [3]. A Indústria 4.0, orientada com dispositivos e sistemas inteligentes de produção, tem o potencial de reduzir o desperdício de produção, super produção, movimentação de mercadorias e consumo de energia. Com o desenvolvimento de estruturas para a integração de redes de produção inteligentes, de modo que se beneficiem do compartilhamento de recursos, como matérias-primas, usinas de energia e força de trabalho. [4].

B. Sustentabilidade

A implementação concreta de um desenvolvimento sustentável é considerada difícil, devido ao alto grau de

complexidade no que diz respeito à amplitude e profundidade dos campos de ação, que apresentam um grande número de interdependências e conflitos de objetivos dentro e entre os campos de ação individuais [5]. As empresas com sistemas de gestão certificados revelam uma maior importância percebida em relação à dimensão da sustentabilidade. Além disso, indústrias com maiores valores de faturamento anual, número de funcionários e as vendas de exportação tendem a dar maior grau de importância às dimensões da sustentabilidade. Considerando os impactos econômicos, ambientais e sociais das indústrias metalúrgicas de nível internacional, a consciência deste setor industrial em relação à importância da sustentabilidade é um passo relevante para o compromisso com o desenvolvimento sustentável [6]. A indústria 4.0 e a sustentabilidade tornaram-se as recentes linhas emergentes de cadeias de fornecimento industriais para melhorar a produtividade e desenvolver uma cultura mais sustentável. A Indústria 4.0 é considerada uma nova mentalidade empresarial que pode ajudar as organizações empresariais e a sociedade a avançar rumo ao desenvolvimento sustentável [7].

C. Eficiência Energética

O Conselho Europeu, sobre a diretiva relativa à eficiência energética, aprovou um objetivo indicativo de 30% no consumo de energia até 2030 para a Europa, incluindo os principais setores como de transporte, de geração elétrica e industrial [8]. O sucesso neste aspecto dependerá em grande parte dos procedimentos considerados de eficiência energética, que é particularmente importante para o setor industrial, cuja utilização intensiva de energia pode representar 80% do consumo total. No setor de metais não-ferrosos, há um alto potencial técnico para reduzir o consumo de energia em 22% com o atual estado da arte da tecnologia [8]. Um estudo de caso italiano de recuperação de calor de uma instalação de fundição de aço mostra como o modelo permite selecionar corretamente o conjunto da rede de aquecimento urbano para explorar desperdício de energia. Instruções de projeto, como a capacidade de armazenamento de energia térmica, também são fornecidas [9]. A crescente demanda global de energia, incluindo a oferta limitada de fontes de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais prejudiciais impulsionaram a necessidade de políticas mais sustentáveis, com a aplicação de fontes de energia ambientalmente amigáveis e renováveis. No entanto, a flutuação, disponibilidade e custo de capital relativamente alto de manutenção e instalação tornaram os dispositivos de energia renovável menos competitivos no mercado. Parece, portanto, que o armazenamento de energia térmica é um caminho a seguir para reduzir custos e aumentar a eficiência [10].

Em outro trabalho foi realizada a avaliação de recuperação de calor residual de um processo contínuo de tratamento térmico de uma planta de fundição de alumínio [8]. Neste trabalho foi caracterizada a energia do processo, para avaliar o consumo de energia relacionado às variáveis operacionais e às estratégias de produção. O primeiro passo consistiu em realizar medições, sendo medidas as vazões de ar de combustão e de gases na chaminé e as temperaturas dos gases de combustão, do ambiente fabril e do ar externo.

D. Automação

A automação industrial e os sistemas automatizados adequados de fabricação são de extrema importância de um ponto de vista competitivo. Portanto, todas as indústrias de manufatura buscam adotar e implementar um conjunto de técnicas automatizadas de manufatura para identificação proativa e resposta a mudanças necessárias que podem levar à melhoria contínua em seu ciclo de fabricação. A automação industrial tem recebido grande atenção devido à sua eficácia em obter vantagem competitiva sustentável e melhorar o desempenho dos negócios [11].

E. Trocadores De Calor

Os principais métodos de análise de trocadores de calor são o método da média logarítmica das diferenças de temperaturas (MLDT) e o método da efetividade-número de unidade de transferência, ϵ -NUT [12]. O método da MLDT é aplicado quando se conhece as temperaturas de entrada e saída dos fluidos que escoam pelo trocador de calor, ou podem ser calculadas facilmente pelo balanço de energia. Porém em algumas situações o uso deste método requer um procedimento iterativo, o que torna preferível em muitas situações o método alternativo da ϵ -NUT.

III. MATERIAL E MÉTODOS

A empresa possui duas máquinas de lavar peças de alumínio que aquecem e secam as peças lavadas à temperatura de 280 °C, o que é feito em câmaras (estufas) de 3,94 m de comprimento por 1,90 m de largura. Nas estufas são instalados queimadores de gás natural (GN) da marca Riello, modelo 40

GS20D, de 81 kW (potência mínima) a 220 kW (potência máxima). Embora o GN seja menos poluente que outros combustíveis fósseis, tendo em que vista sua composição química é predominantemente metano (CH₄). Esse é um hidrocarboneto leve, que também pode apresentar os mesmos problemas que outros combustíveis fósseis quando não é misturado adequadamente com o ar de combustão. A Tabela 1 reporta a composição típica do GN fornecido pela concessionária no Rio Grande do Sul (Sulgás).

Tabela 1- Características do GN.

Componente	Valores
Metano	90,0% em vol.
Etano	5,6% em vol.
Propano	1,5% em vol.
CO ₂	1,3% em vol.
N ₂ +CO ₂	2,05% em vol.
S total	3,3 mg/m ³
H ₂ S	2,8 mg/m ³
Hg	0,014 µg/m ³

Fonte: [13]

O plano de implementação se caracteriza em um sistema de aproveitamento de energia térmica do sistema de secagem da máquina de lavar 1 do esquema mostrado na Figura 1. Para tanto, foi proposto o projeto de um trocador de calor, para aquecer a água utilizada na osmose reversa para desmineralização da água utilizada no último estágio de lavagem das peças de alumínio, antes de pintar o revestimento antiaderente.

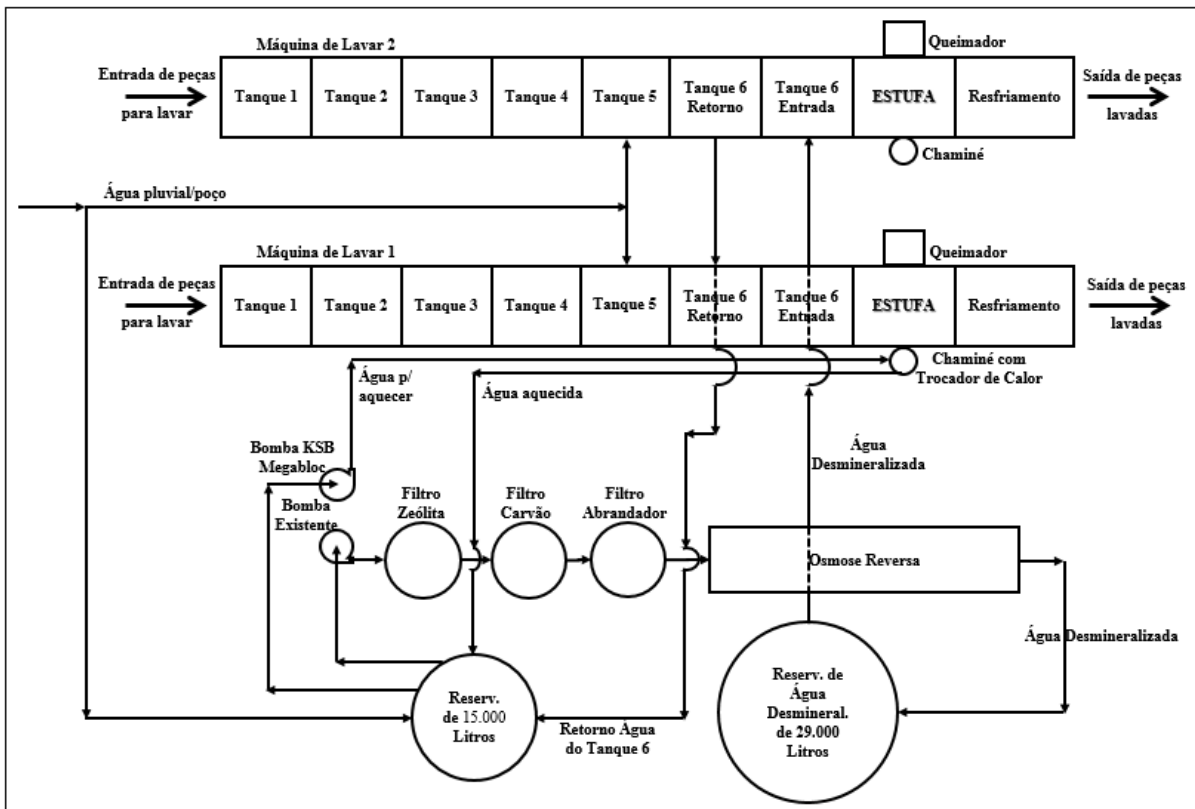


Figura 1 – Esquema de processo de lavagem com água desmineralizada para duas máquinas de lavar.

O trabalho apresentado neste artigo refere-se à análise de energia da estufa da máquina de lavar de número 1 mostrada na Figura 1 para secar as peças de alumínio. A Figura 2 mostra a imagem da chaminé da máquina de lavar 1, na qual foi instalado um trocador de calor. As chaminés das estufas de ambas as máquinas de lavar são de aço inox 304 e tem diâmetro interno de 250 mm.



Figura 2 - Chaminé da estufa da máquina de lavar 1.

A proposta de implementação se caracteriza em um sistema de reaproveitamento de energia térmica do sistema de secagem da máquina de lavar 1. Para tanto, foi proposto o projeto de um trocador de calor, para aquecer a água utilizada na osmose reversa para desmineralização da água utilizada no último estágio de lavagem das peças de alumínio, antes de pintar o revestimento antiaderente.

Para determinar a temperatura dos gases de combustão escoando pela chaminé, utilizou-se um termômetro marca Exacta modelo EX-1200 K- com termopar tipo k. O conjunto termômetro-termopar utilizado foi calibrado por uma empresa especializada em 29 de agosto de 2018.

A velocidade dos gases de combustão foi medida na boca de saída da chaminé com um anemômetro marca Airflow modelo TA 35, resolução de 0,1 m/s, sendo os valores de temperatura e de velocidade, respectivamente, de 81 °C e 21,6 m/s. Essas medidas serviram para estimar a vazão mássica de gases de combustão (\dot{m}_{gases}) em kg/s na saída da chaminé pela equação (1) a seguir.

$$\dot{m}_{gases} = \rho_{gases} \cdot \dot{V}_{gases} = \frac{p_{atm}}{R_{N_2} \cdot T_{gases}} \cdot V_{gases} \cdot A_{cham} \quad (1)$$

onde ρ_{gases} é a massa específica dos gases de combustão, em kg/m³; \dot{V}_{gases} é a vazão volumétrica dos gases de combustão, em m³/s; p_{atm} é a pressão atmosférica ambiente e estimada em 92,5 kPa para o local da instalação (Carlos Barbosa/RS); R_{N_2} é a constante do nitrogênio por ser, em geral, a concentração desse gás cerca de 70% em volume dos gases de combustão e

igual a 0,2968 kJ/kg·K; T_{gases} é a temperatura absoluta dos gases de combustão e igual a 354,15 K (81 + 273,15); V_{gases} é a velocidade dos gases de combustão pela chaminé (21,6 m/s); e A_{cham} é a área transversal da chaminé. Portanto, com os valores conhecidos e aplicados à equação (1) tem-se

$$\dot{m}_{gases} = \frac{92,5}{0,2968 \cdot 354,15} \cdot 21,6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \cong 0,93 \text{ kg/s}$$

O dimensionamento térmico do trocador de calor implica na determinação da área necessária para efetuar a transferência de calor entre os fluidos que escoam pelo equipamento. Diante de vários tipos de trocadores de calor que podem ser diferenciados pela sua forma construtiva, modo de troca de calor e processo de transferência de calor.

A empresa possui uma equipe de manutenção qualificada e capacitada, mas devido ao curto prazo para implementação, foi proposto fabricar externamente o trocador de calor, reduzindo assim o tempo para a instalação do projeto. Os valores de temperatura e de velocidade, citados anteriormente e a vazão de água de 4 m³/h utilizada no abastecimento da osmose reversa foram passados para o fornecedor (Thermo Pipe).

Para a sua construção foram utilizados tubos de aço inox 304 com costura aletados (aletas circulares) externamente, sendo o fluxo de água pelo interior dos tubos. Possui também o sistema de by-pass, ou seja, quando falta água no trocador, a passagem do gás é desviada. Assim os gases quentes não passam pelo trocador de calor, fazendo com que a temperatura da água no tanque de alimentação da osmose não ultrapasse a temperatura de 40 °C, aumentando a vida útil do trocador de calor. O modelo do trocador adotado foi do tipo correntes cruzadas. A estrutura externa do trocador de calor é aço 1020 com pintura de alumínio para alta temperatura.

Devido à grande quantidade de solda efetuada para a montagem do trocador de calor entre os tubos e curvas, a Thermo Pipe submeteu o trocador de calor a um teste hidrostático, para evitar possíveis vazamentos, sendo enviado o certificado do teste e dos materiais utilizados.

A Figura 3 mostra as principais informações técnicas do trocador de calor fabricado pela Thermo Pipe.

Fez-se também necessária a instalação de uma bomba para circulação da água e um sistema de monitoramento da sua temperatura.

Foi utilizado tubulação de aço galvanizado roscado de 1 polegada para conectar a caixa de água até o trocador de calor.

Para a seleção da bomba foi necessário o reconhecimento do local específico onde foi instalada, para assim determinar a diferença de pressão que deve exercer para o fluido se deslocar ao longo da tubulação, mantendo a vazão volumétrica solicitada de 4 m³/h.

As perdas de carga decorrentes do percurso foram classificadas por suas características, e são apresentadas na Tabela 2, em metros de coluna de água. Com a soma das perdas de carga, correspondendo a aproximadamente 34 m de coluna de água (m.c.a) e, com a vazão volumétrica da bomba, determinou-se a potência necessária para o bombeamento da água. Através da consulta ao catálogo da KSB, fabricante de

bombas, selecionou-se a bomba trifásica, KSB Megabloc, modelo 40-25-160 GG, de 2,2 kW (3 cv) de potência.

CONEXÕES					
D	1	ØE 252	-		SAÍDA DO GÁS
C	1	ØE 252	-		ENTRADA DO GÁS
B	1	3/4"	ANSI B 16.5		SAÍDA DA ÁGUA
A	1	3/4"	ANSI B 16.5		ENTRADA DA ÁGUA
ITEM	QUANT.	Ø NOM.	SERIE		FUNÇÃO
PESOS ESTIMADOS					
SUPERFÍCIE DE TROCA		(m ²)	22,2		
CALOR TROCADO		(Kcal/h)	115.661		
NÚMERO DE PASSES			18	1	
PRESSÃO DE TESTE		(Kgf/cm ²)	3,0	-	
PRESSÃO DE OPERAÇÃO		(Kgf/cm ²)	2,0	1,033	
PERDA DE CARGA			0,336 KGF/CM ²	3,318 (mm.c.a)	
TEMPERATURA DE SAÍDA		(°C)	40,0	~318	
TEMPERATURA DE ENTRADA		(°C)	10,0	420	
VAZÃO		kg/h / Nm ³ /h	4000	4500	
FLUIDOS			ÁGUA	GÁS	
MATERIAIS					
COLETORES:		A 312	TUBOS DO FEIXE: ASTM A 249/269		
FLANGES BOCAIS:		ANSI B 16.5 F304	ALETAS: A 240 TP 304		
ESPELHOS:		A 36 / SAE 1010/20	PESCOÇOS: A 312		
ELIMINADOR:		-	ESTRUTURAS: A 36/SAE 1010/20		
Thermo Pipe		Thermo Pipe Equipamentos Industriais Ltda. R. Tramontina, 487 - Jd. Presidente Dutra - CEP 01171-050 - Guarulhos (11) 2431-2323 - www.thermopipe.com.br			
TODAS AS MUDANÇAS DEVEM SER FEITAS POR MEIO DE UMA NOTA DE MUDANÇA DE PROJETO		NÃO APROPRIAR MUDANÇAS MANUAS		Desenho: 02/2019 gmb 1:1 Projeto: 12/2019 gmb Revisão: 02/2019 gmb	
Escala: 1:1		Descrição: 001-156/19		Revista: 02/2019 156/19	
Descrição: AQUECEDOR DE ÁGUA		Projeto: 001-156/19		Cliente: TRAMONTINA S.A.	

Figura 3 – Dados do trocador de calor. Fonte: Thermo Pipe.

Tabela 2 - Perdas de carga do sistema.

Elemento	Quant.	Tipo de perda	Δh (m.c.a.)
Tubulação aço galvanizado 1"	100 m	Distribuída	21,8
Curva 90°	12	Localizada	0,7
Trocador de calor	1	Localizado	3,3
Registro	2		8,2
Total			34,0

Foi instalado um Sistema de PLC ligado a um sensor PT-100, ligado a uma eletroválvula que aciona os cilindros pneumáticos que abrem e fecham o sistema de *by-pass*, evitando a interferência humana.

A Figura 5 apresenta as principais dimensões do trocador de calor fabricado pela Thermo Pipe.

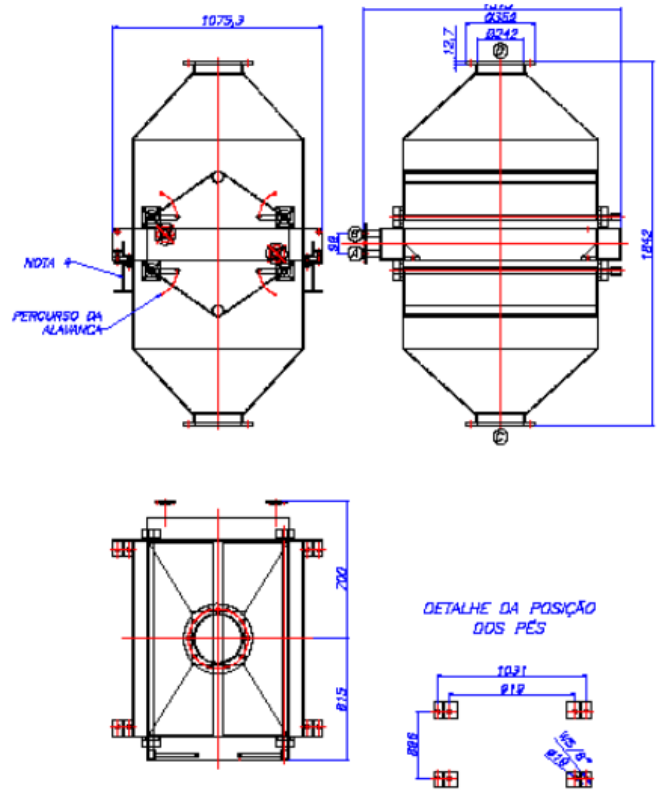


Figura 5 – Dimensões principais do trocador de calor.

A Figura 4 ilustra a instalação do trocador de calor junto à chaminé de uma das duas máquinas de lavar. Foram instalados quatro pés para dar sustentação ao trocador de calor.



Figura 4 - Trocador de calor instalado e em funcionamento na chaminé.

Somando os investimentos para o projeto, obteve-se o valor de aproximadamente R\$ 65.650,00. Nesta quantia deve ser adicionado o valor mensal gasto na energia elétrica consumida pela bomba, que irá operar 17,2 horas diárias, por 22 dias mensais, totalizando aproximadamente 2,2 kW x 17,2 h/dia x 22 dias/mês x R\$ 0,49/kWh (tarifa EE) = R\$ 407,91/mês.

IV. RESULTADOS

Com a instalação do trocador de calor foi obtida a elevação da temperatura da água que entra na osmose reversa. A temperatura da água que antes entrava entre 15 °C e 20 °C, dependendo das condições ambientes, agora conseguiu-se uma temperatura estável de 33 °C, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 - Temperatura da água da alimentação da osmose reversa após o aquecimento.

Devido à falta de alguns componentes para terminar a automação do Sistema (quatro cilindros e uma eletroválvula) os testes foram realizados manualmente. Foi ligado a bomba no painel, após abriu-se se os dampers e a temperatura foi controlada com um termômetro na caixa de água que alimenta a osmose reversa.

A temperatura da água de retorno na caixa de água permaneceu entre 33,9 °C e 34 °C. A Figura 7 ilustra o painel de medidores da osmose reversa.



Figura 7 – Instrumentação utilizada no processo de osmose reversa.

A quantidade de água desmineralizada produzida passou de 1,8 m³/h para 3,2 m³/h. Com o aumento de 77,8% foi possível trabalhar com as duas máquinas de lavar por 17 horas/dia e 5 dias por semana. Antes era possível por apenas 8,8 horas/dia.

Cada máquina de lavar lava 800 peças/hora e utilizava 1,8 m³/hora de água desmineralizada. Com a capacidade de produzir 3,2 m³/h e com um reservatório de água desmineralizada de 29 m³ (já instalado), pode-se considerar que se 1,8 m³ lavam 800 peças, com 3,2 m³ (mais o volume do reservatório) é possível lavar em torno de 1.420 peças (aumento de 620 peças/h).

Considerando o custo de R\$ 0,10/peça, tem-se um ganho mensal (G) de:

$$G = 620 \text{ peças/h} \times \text{R\$ } 0,10/\text{peça} \times 17 \text{ horas/dia} \times 22 \text{ dias/mês}$$

$$G = \text{R\$ } 23.188/\text{mês para uma máquina de lavar.}$$

Descontando o valor mensal gasto na energia elétrica consumida pela bomba, que irá operar 17,2 horas diárias, por 22 dias mensais, totalizando aproximadamente 2,2 kW x 17,2 h x 22 dias x R\$ 0,49 (tarifa EE) = R\$ 407,91/mês.

Então o ganho líquido no período (G_{liq}) foi de:

$$G_{liq} = \text{R\$ } 23.188/\text{mês} - \text{R\$ } 407,91/\text{mês.}$$

$$G_{liq} = \text{R\$ } 22.780,09/\text{mês.}$$

Para calcular o tempo necessário para recuperar o custo do investimento (*payback* simples), utiliza-se a seguinte equação:

$$\text{Payback Simples } (P_s) = \text{Investimento inicial } (I) / \text{Ganho líquido no período } (G_{liq})$$

Então:

$$P_s = I / G_{liq} = \text{R\$ } 65.650,00 / \text{R\$ } 22.780,09/\text{mês}$$

$$P_s = 2,88 \text{ meses.}$$

Ou seja, em aproximadamente 3 meses a empresa irá recuperar o dinheiro investido no projeto.

V. CONCLUSÃO

A Indústria 4.0 marca um significativo avanço na relação entre o homem e a máquina. Efetuando uma mudança ampla nas empresas, transformando a maneira como as máquinas se comunicam e utilizam as informações para otimizar o processo de produção, tornando-o ágil, autônomo e eficiente.

Uma das vantagens competitivas das empresas atualmente é a sustentabilidade, que é um dos pilares da Indústria 4.0 que promove o desenvolvimento econômico considerando o desenvolvimento e a qualidade de vida das pessoas e os impactos naturais, como por exemplo, o reuso de água e a eficiência energética.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar e implementar um trocador de calor afim de reaproveitar energia térmica provinda de uma chaminé e empregar a carga térmica recuperada para o aquecimento de água para a osmose reversa. Optou-se por um trocador de calor com tubos aletados pela necessidade de acomodar a área de troca térmica em um espaço menor. Através da análise experimental obteve-se dados reais do sistema de exaustão, sendo estes a temperatura e a vazão mássica dos gases da chaminé. Mediante dimensionamento analítico do trocador de calor foi

determinada a área mínima de troca térmica para alcançar a temperatura de 33 °C.

Sugere-se para futuros trabalhos um estudo mais detalhado para a reutilização também dos gases dos fornos de fundição de alumínio, para que se possa aumentar a eficiência energética e usar esta energia em outras etapas do processo industrial.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Weg, 2018, “Porque a indústria 4.0 representa ganho em eficiência para as empresas”, 21 ago. 2019, <<https://www.weg.net/institutional/news/produtos-e-solucoes>>.
- [2] DALENOGARE, Lucas Santos et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal Of Production Economics**, [s.l.], v. 204, p.383-394, out. 2018. Elsevier BV.
- [3] FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, [s.l.], v. 210, p.15-26, abr. 2019. Elsevier BV.
- [4] KAMBLE, Sachin S.; GUNASEKARAN, Angappa; GAWANKAR, Shradha A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, [s.l.], v. 117, p.408-425, Jul. 2018. Elsevier BV.
- [5] STOCK, Tim et al. Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. **Process Safety and Environmental Protection**, [s.l.], v. 118, p.254-267, ago. 2018. Elsevier BV.
- [6] ARMINDO, J. et al. Perceived importance of sustainability dimensions in the Portuguese metal industry. **International Journal Of Sustainable Development & World Ecology**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.154-165, 27 ago. 2018. Informa UK Limited.
- [7] LUTHRA, Sunil; MANGLA, Sachin Kumar. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. **Process Safety And Environmental Protection**, [s.l.], v. 117, p.168-179, jul. 2018. Elsevier BV.
- [8] BONILLA-CAMPOS, Iñigo et al. Energy efficiency assessment: Process modelling and waste heat recovery analysis. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 196, p.1180-1192, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.074>.
- [9] SIMEONI, Patrizia et al. Integrating industrial waste heat recovery into sustainable smart energy systems. **Energy**, [s.l.], v. 175, p.941-951, maio 2019. Elsevier BV.
- [10] MAHDI, Jasim M.; LOHRASBI, Sina; NSOFOR, Emmanuel C.. Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 137, p.630-649, jul. 2019. Elsevier BV.
- [11] ACHARYA, Vikas; SHARMA, Somesh Kumar; GUPTA, Sunand Kumar. Analyzing the factors in industrial automation using analytic hierarchy process. **Computers & Electrical Engineering**, [s.l.], v. 71, p.877-886, out. 2018. Elsevier BV.
- [12] INCROPERA, F. P.; et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 644 p.
- [13] SULGÁS, 2019, “Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul”, 3 Set. 2019, <<http://www.sulgas.rs.gov.br>>.
- [14] KSB. **Linha Megabloc Catálogo de seleção - KSB**. 2007. Disponível em: <www.ksb.com.br>. Acesso em: 1 dez. 2019.