ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR SUPERAQUECIDO – UMA AVALIAÇÃO PRELIMINAR

Gustavo Alfredo Fucks [(1)] (fuchsreal@gmail.com), Sandra Raquel Kunst [(2)] (tessaro.sandra@gmail.com), Cláudia Trindade Oliveira [(1)] (ctofeevale@gmail.com), Jane Zoppas Ferreira [(2)] (jane.zoppas@ufrgs.br), Luciane Taís Fuhr [(1)] (luciane.fuhr@gmail.com)

[(1)] Universidade Feevale; ICET – Instituto de ciências exatas e tecnológicas, Novo Hamburgo – RS – Brasil.
[(2)] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); LACOR - Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais, Porto Alegre – RS – Brasil.

RESUMO: *A otimização dos processos de produção está associada a aumentar a capacidade produtiva reduzindo os custos de produção e racionalizando a utilização dos recursos. Os sistemas de cogeração estão relacionados com a redução nos custos das plantas produtivas, para aumentar a eficiência energética total da indústria aproveitando calor rejeitado pelos processos transformando em trabalho útil. Este estudo tem por finalidade avaliar a viabilidade de aproveitar calor excedente em um forno de fundição de cristal para cogeração de energia elétrica com um sistema de potência a vapor. Portanto foi considerado o calor disponível em excesso no processo, a demanda elétrica da indústria estudada e a necessidade de vapor para atender a esta demanda. Após comparativo dos resultados se evidenciou a inviabilidade do projeto, pois o incremento no consumo do combustível mostrou-se financeiramente maior que a redução na energia produzida pelo sistema.*

PALAVRAS-CHAVE: *COGERAÇÃO, GERAÇÃO DE VAPOR, TRANSFERÊNCIA DE CALOR.*

FEASIBILITY STUDY OF THE INSTALLATION OF A SUPERHEATED STEAM GENERATION SYSTEM - A PRELIMINARY EVALUATION

ABSTRACT: *The optimization of production is associated with increasing production capacity by reducing production costs and rationalizing the use of resources. The cogeneration systems are related to the reduction in the costs of the productive plants, increasing the total energy efficiency of the industry, taking advantage of heat rejected by the processes transforming into useful work. This work aims to make a feasibility study to take advantage of excess heat in a crystal furnace, using this energy for cogeneration of electric power with a steam power system. Therefore, it was considered the excess available heat in the process, the electrical demand at studied industry and the need of steam to meet this demand. After comparing the results showed the unfeasibility of the project, the increase in fuel consumption will be much greater than the reduction in energy produced by the system.*

KEYWORDS: *Cogeneration, steam generation, heat transfer.*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE
Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento dos recursos renováveis e utilização de fontes alternativas para geração de energia elétrica estão entre os pontos de maior análise e discussão. Atualmente o aquecimento global, emissão de CO_2 gerando o efeito estufa, escassez do petróleo e por consequência os combustíveis derivados dele, são o foco de estudos e investimento para novas áreas de geração energia. Por exemplo, na utilização de biodiesel, biogás e biomassa como fonte de energia, tornando assim questão energética pauta em vários pontos.

Em 2001, o Brasil passou por uma situação de escassez no fornecimento de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2001). Com isso várias medidas foram tomadas com vista a melhorar e diversificar a matriz enérgica do país. A regulação do sistema de comercialização de energia elétrica permitiu a empresas de pequeno porte, com potência instalada inferior a 1MW, gerarem e venderem energia elétrica excedente para as concessionárias distribuidoras do sistema, fazendo assim um sistema de compensação do consumo de energia e diversificando a matriz energética brasileira. Esta nova regulação viabiliza estudos de aumento da eficiência energética através da cogeração de energia elétrica (BRASIL, 2016). A possibilidade de redução dos custos de operação é uma questão muito importante à competitividade das empresas. A preocupação de todas as empresas é produzir mais, melhor e consumir menos recursos para atingir tais objetivos. Estas metas são alcançadas através de inovação, transformação e readequação dos processos, equipamentos e instalações (BRAND,2014).

A produção de cristal para decoração é um mercado com mudanças constantes nos itens produzidos, pois está ligado diretamente à moda do setor decoração de interiores. A forma de produção do cristal se dá em duas formas: produção automatizada ou robotizada, totalmente independente da intervenção humana com grande volume de produção; e a produção artesanal, que, ao contrário, é totalmente dependente da habilidade do artesão em reproduzir as peças de forma empírica e intuitiva. Em ambos os processos, contudo, há a necessidade da fusão do cristal, matéria-prima base, o que normalmente ocorre em fornos aquecidos com a queima de combustíveis como o gás liquefeito de petróleo (GLP). Como a energia necessária para a fusão é alta, assim como o é para a manutenção do estado líquido do cristal, é comum o dimensionamento do sistema de combustão para fornecer calor acima do necessário, para garantir que a matéria prima esteja totalmente fundida para a modelagem dos artefatos. Isso fornece ao sistema calor excedente, que é liberado para a atmosfera, sendo um desperdício de energia. Neste sentido, o objetivo é avaliar a viabilidade da instalação de um sistema de cogeração de energia utilizando calor rejeitado pelas paredes do forno de fusão de cristal de uma cristaleria artesanal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em uma indústria de produção de cristais para decoração localizada na cidade de Gramado, RS. Fundada em 2002, foi pioneira no Rio Grande do Sul na produção de peças de decoração com a técnica de trabalho artesanal e artística e aberta à visitação. A empresa tem capacidade de produção diária de 200 kg de cristal. O setor produtivo da empresa tem dois fornos de fundição de cristal transparente utilizado na confecção de todas as peças fabricadas. Os fornos de fusão de cristal trabalham 24 horas por dia e todos os dias da semana; durante o dia ocorre a extração do cristal do forno de forma artesanal, e neste período o forno está com temperatura média de 1150ºC. No final do dia, o forno é carregado com matéria prima e inicia o processo de fundição, que ocorre durante toda a noite, com temperatura média de 1250°C.

2.1 Instrumentos e medições

Para o desenvolvimento do trabalho foram realizadas medições de temperatura no forno e vazão do combustível, utilizando-se os instrumentos citados na Tabela 1.

TABELA 1. Instrumentos utilizados.

Instrumento	Modelo	Marca	Resolução
Controlador de temperatura	NS2000s	Novus	
Termopar tipo S	Não especificado	thermomax	+- 1,5°C
Termômetro digital laser	Ak900	Akron	+- 3%
Rotâmetro	Omel 4T7	Omel	+-2% fundo de escala

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O termopar tipo S apresentado na Tabela 1 está posicionado na parede interna do forno de fusão do cristal e ligado ao controlador de temperatura, este é utilizado para a automação do controle da temperatura do forno. Foi estipulada como condição de processo a uniformidade da temperatura em todas as paredes do forno desconsiderando possíveis diferenças devido à proximidade da chama e a geometria e cantos do forno.

As temperaturas, da parede interna, foram medidas em duas etapas: durante o dia foram feitas tomadas visuais no controlador de temperatura durante 1 dia com intervalos de 1 hora entre cada medida iniciando as 8:00 e com termino as 18:00. Neste período o forno opera em modo manual e a extração do cristal pode ocasionar oscilações na temperatura interna, pela abertura da porta do

forno. No turno noturno foi feita uma média da curva de fundição, que opera em malha fechada de controle.

Para medição da temperatura externa das paredes do forno foi utilizado o termômetro digita laser. A medida foi realizada diretamente no material refratário parede superior do forno, foi realizada uma mediação, pois a parede do forno se encontra isolada por três camadas de manta cerâmica e isolado por uma chapa metálica, assim o sistema foi considerando isotérmico em relação ao meio externo e sem interferências da variação da temperatura ambiente. As mesmas condições de processo das paredes internas foram utilizadas nas paredes externas.

A Figura 1 mostra os pontos de medição das temperaturas no forno. Para melhor visualização foi utilizado modelo 3D e foram retirados da representação alguns equipamentos com as mantas de isolação, o sistema de exaustão, o queimador e as chapas metálicas de acabamento.

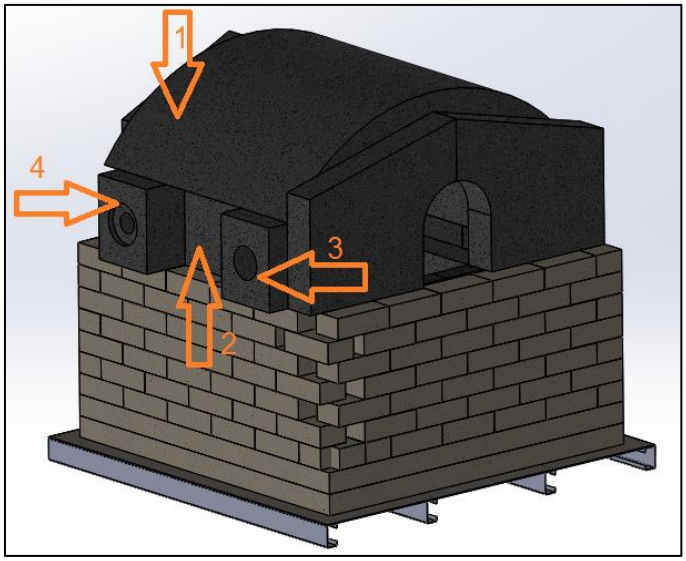

FIGURA 1. Pontos de medições. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Conforme mostrado na Figura 1 o ponto indicado número 1 é o local onde foi realizada a medição da temperatura externa da parede do forno com o termômetro digital. Já no ponto 2, é o local onde está instalado o termopar tipo S, entre a entrada do queimador mostrado pelo ponto 4 e a saída dos gases de exaustão indicado na Figura 1 pela flecha de número 3.

A vazão do GLP foi medida através do rotâmetro, com anotação manual da vazão a cada hora no turno diurno onde o forno trabalha em modo manual, para o turno noturno foi calculado conforme as vazões da malha fechada. O forno trabalha em sistema *ON/OFF* assim foi medido quanto tempo precisa para aumentar a temperatura em 1°C e qual a vazão correspondente. Assim

analisando a curva de fundição foi calculada a vazão média do período. A temperatura máxima de fundição é 1250°C.

2.2 Seleção da turbina

Para determinar a turbina necessária foi realizado um levantamento do consumo de energia, analisando as contas de energia elétrica fornecidas pela empresa. A análise foi realizada em período de um ano, assim foi levado em consideração a sazonalidade da empresa. Considerou-se uma margem de crescimento de 20% no consumo de energia elétrica de acordo com a perspectiva de crescimento da empresa. O ano base da análise foi 2017/2018, conforme mostrado na Tabela 2, levando-se em consideração a regularidade de produção e de operação da fábrica neste período de tempo.

TABELA 2. Consumo de energia elétrica.

Mês/Ano	KWh	Valor Pago
Julho/2018	19803	R$ 10.297,56
Junho/2018	23680	R$ 12.313,60
Maio/2018	23060	R$ 11.991,20
Abril/2018	21891	R$ 11.383,32
Março/2018	22951	R$ 11.934,52
Fevereiro/2018	25025	R$ 13.013,00
Janeiro/2018	27740	R$ 14.424,80
Dezembro/2017	21473	R$ 11.165,96
Novembro/2017	19975	R$ 10.387,00
Outubro/2017	16710	R$ 8.689,20
Setembro/2017	23273	R$ 11.171,04
Agosto/2017	21195	R$ 10.173,60
Média anual atual	21705	R$10.418,36
Média anual acrescida 20%	27131	R$13.022,95

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a análise, as seguintes condições foram propostas: o sistema operou de forma contínua e sem interrupções (portanto o valor médio do kWh mês demandado pela empresa, foi divido pelo número de horas trabalhas no mês). O resultado é o valor do kW necessário para atender a empresa

considerando que durante o dia a empresa tem picos de consumo e no período da noite o sistema produziu mais energia que o consumido. Não foram considerados: potência instalada, demanda contratada, fator de potência dos equipamentos instalados na empresa, pois foi considerado em sistema de compensação de energia.

A partir da demanda requerida de energia elétrica, um modelo comercial de turbina foi escolhido, com auxílio de fornecedores desse tipo de equipamento. Através da definição do modelo, foi identificada a especificação de fornecimento de quantidade e pressão de vapor necessário para alimentação da turbina.

2.3 Análise do calor requerido

Determinada a turbina a ser usada e quantidade de vapor requerida para acionar, o próximo passo foi determinar a quantidade de calor para transformar a água em temperatura ambiente em vapor útil para o sistema. Neste caso o processo de ebulição foi separado em três etapas devido a operação proposta, com circuito fechado. Assim, a água recirculará, diminuído a diferença de temperatura entre entrada e saída e por consequência a quantidade de calor.

As três etapas do processo de ebulição são: transferência de calor sensível: aquecer a água da temperatura ambiente para a temperatura de ebulição; vaporização: vaporizar toda a quantidade de água necessária para acionar a turbina; superaquecer o vapor: transferência de calor sensível para o vapor alcançar a temperatura e pressão necessárias à turbina.

Para realizar o cálculo do calor necessário para acionar a turbina foi utilizada a Equação 1 que considerando mudança de fase em um dos fluídos, utilizando os dados da Tabela 3.

$$Q = \dot{\omega}_f C_{pf}\left(T_{2f} - T_{1f}\right) = \dot{\omega}_q[C_{pq}\left(T_s - T_{1q}\right) + \lambda + C_{pvq}\left(T_s - T_{2q}\right)] \qquad (1)$$

Na Equação 1, os termos representam: Q, calor total do processo (W0; $\dot{\omega}_f$, vazão mássica do fluído frio (kg/s); C_{pf}, calor específico do líquido a pressão constante do fluído frio (J/kg.°C); T_{2f} , temperatura do fluido frio quando sai do trocador (°C); T_{1f}, temperatura do fluído frio ao entrar no trocador (°C), no lado com troca de fase; $\dot{\omega}_q$, é a vazão mássica do fluído quente (kg/s); C_{pq}, é o calor específico do líquido a pressão constante do fluido quente (J/kg.°C); T_s, é a temperatura de saturação na pressão de operação do fluído quente (°C); T_{q1} temperatura do fluído quente ao entrar no trocador (°C); λ, é o calor calor latente de vaporização nas condições do processo, temperatura e pressão(J/kg); C_{pvq}, é o calor específico do vapor superaquecido a pressão constante do fluído

quente (J/kg.°C); e por fim, T_{2q}, é a temperatura do vapor superaquecido na saída do trocador (°C) (ARAUJO, 2014).

TABELA 3. Propriedades termodinâmicas da água.

Temperatura de saturação (°C)	Pressão (kg/cm²)	Calor sensível líquido (kJ/kg.K)	Calor latente (kJ/kg)	Calor sensível vapor (kJ/kg.K)
190	11,71	4,31	1.989,00	2,28

Fonte: Adaptado de Incropera (2014).

A Equação 1 tem como condição calor específicos constantes, com isso os dados da Tabela 3 foram considerados valores médios entre o calor especifico na temperatura de entrada da água e na temperatura de saída, nas etapas 1 e 3. A etapa 2 não tem variação de temperatura, portanto o calor especifico é mesmo no início e no fim da etapa. O somatório das 3 etapas é a quantidade total de calor para processo. Os dados de temperatura da água considerados para cada transição de estado são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Temperaturas do processo.

Situação do Processo	Temperatura (°C)
Saturação na pressão (12kg/cm²)	190
Líquido resfriado	45
Vapor superaquecido	200

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 4 traz as temperaturas de processo e cálculo do calor requerido. A temperatura de saturação foi definida pela pressão do processo mostrada na Tabela 3 está pressão foi definida pelo fabricante da turbina. Considerando que o ciclo será fechado com condensador, portanto, a temperatura da água na saída do condensador deverá ser de 45°C, temperatura definida pelo fabricante da turbina.

2.4 Análise do calor excedente

Para analisar o calor excedente do forno foi considerado o calor gerado pela queima do combustível, para determinar quanto de calor há na área interna do forno em estudo, apresentado na Figura 2.

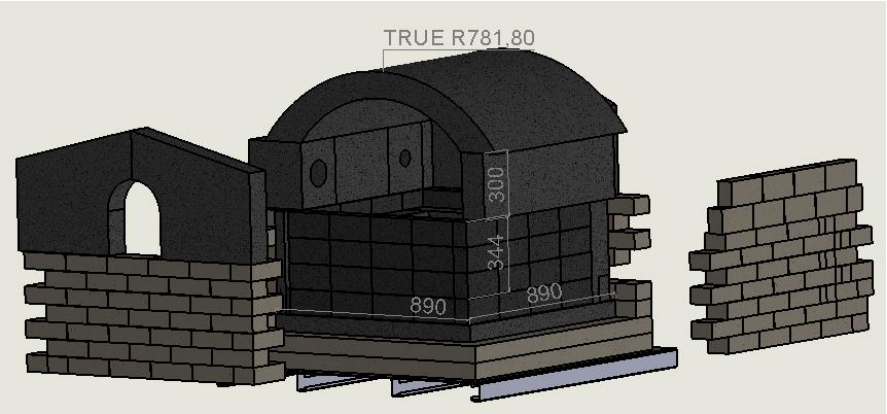

FIGURA 2. Forno de Fundição de Cristal. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para calcular a área total do forno foram utilizadas as medidas mostradas na Figura 2, estas estão expressas em milímetros. Foi considerado as paredes laterais do tanque, as paredes laterais da área superior ao tanque, o fundo do tanque e o teto, foi excluído a parte frontal, e o local onde está situado a entrada do queimador e saída dos gases de exaustão.

O Forno de fundição de cristal tem um tanque na parte inferior onde fica depositado todo o cristal líquido disponível para trabalho, conforme mostrado na Figura 2. Este forno utiliza como combustível GLP (gás liquefeito de petróleo). O forno trabalha por batelada que tem duração de 24 horas, formada por dois processos: a fundição do cristal dura cerca de 10 horas e ocorre durante a noite. Durante o dia ocorre o fornecimento de calor para manter a massa líquida, garantindo a extração do cristal com ferramentas próprias. Ao final do dia, o tanque é carregado novamente iniciando outra fundição.

A quantidade de calor total fornecida pelo combustível foi determinada considerando a vazão mássica média por batelada e o poder calorifico do GLP definido pela Agência Nacional do Petróleo (Rio de Janeiro,2013). As temperaturas foram medidas no lado interno e externo das paredes do forno, possibilitando o cálculo de calor perdido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os resultados do estudo realizado para instalação do sistema de geração de energia elétrica por turbina a vapor.

3.1 Quantidade de vapor

A quantidade de vapor necessária para acionar a turbina depende do tamanho da turbina. Para a seleção da turbina, dados comerciais de um fornecedor desse tipo de equipamento foram consultados, e determinado o modelo considerando o consumo de energia elétrica médio mensal da empresa analisada. A operação prevista da turbina será de forma contínua (considerando uma produção em todos os dias do mês conforme Tabela 5).

TABELA 5. Potência real.

Parâmetros	Dado	Unidade
Horas úteis de produção no mês	719	h
Consumo médio mensal	27789	kWh
Potência real da turbina	38,65	kW

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Como mostrado na Tabela 5 a potência real da turbina deve ser aproximadamente de 38kW. Considerando o fator de potência do gerador e a eficiência da turbina o modelo indicado pelo fornecedor foi uma turbina de 50 kW ilustrado pela Figura 3.



FIGURA 3. Turbina selecionada. Fonte: Brmini turbinas (2016).

A seleção do fornecedor e da turbina se deu de acordo com a capacidade de industrialização de uma turbina de baixa potência (no caso, 50kW), porém com alta eficiência (Figura 3). Como o sistema é para pequenas centrais cogeradoras de energia elétrica, a demanda de espaço físico de instalação do sistema é pequena (Figura 4).



FIGURA 4. Turbina instalada. Fonte: Brmini turbinas (2016).

A Figura 4 ilustra a instalação de um sistema para 6 kW, demostrando como a instalação é compacta e requer pouco espaço físico a área ocupada pelo sistema é de 1,26 m². Segundo o fornecedor (BRMINI TURBINAS, 2016), o controle da entrada de vapor pode ser automatizado, variando conforme a necessidade de geração e conforme oferta de vapor no sistema, ou manual, com um valor pré-definido de vapor e geração.

Após especificar potência necessária para a turbina atingir a demanda elétrica, a quantidade de vapor requerida para este equipamento é de 1300 kg/h com pressão de 12 kgf/cm². Nestas condições de operação a turbina produzirá 38,65 kWh.

O cálculo da quantidade de calor necessária para gerar o vapor utilizou a Tabela 6, relacionando a vazão de vapor com quantidade de calor para sua geração nas condições do processo.

TABELA 6. Calor de vaporização.

Vazão (kg/h)	Q_1 (kW)	Q_2 (kW)	Q_3 (kW)	Q_{total} (kW)
1300	232,48	718,25	9,68	960,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Tabela 6, a quantidade de calor total necessária para a condição pré-estabelecia é de 960,41 kW. A maior demanda energética será para transformar o líquido em vapor (Q_2), ou seja,

a quantidade de calor latente requerida para a vazão de operação . A segunda maior necessidade de energia é o calor sensível, ou seja, aquecer o líquido até a sua temperatura de ebulição, na pressão do processo (Q_1); isto já era esperado conforme Incropera et al. (2015) e Nascimento e Biaggioni, (2010). A menor demanda energética é o superaquecimento do vapor (Q_3), pois segundo Torreira (2002), o vapor superaquecido comporta-se de forma similar aos gases, assim, seu calor especifico será menor. Desta forma a potência requerida do trocador de calor deverá ser superior ao calor total de ebulição (Q_{total}).

3.2 Calor excedente

A Tabela 7 mostra os resultados das condições de operação atual do forno considerando que servirão de base para a determinação do calor excedente pelas paredes do forno.

TABELA 7. Dados do forno.

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão média de GLP por batelada	6,2	Kg/h
Poder calorifico inferior do GLP	46000	kJ/kg
Medida da temperatura interna do forno considerando médias do dia e médias da noite	1190	°C
Medida da temperatura externa do forno	500	°C
Coeficiente de condução do material refratário	1,63	W/(m*K)
Espessura da parede	0,12	m
Área total	3,5778	m²

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O poder calorifico do GLP definido pela Agência Nacional do Petróleo (Rio de Janeiro,2013), o anexo 1 mostra a FISPQ do GLP onde tem suas informações mais relevantes. O coeficiente de condução do material refratário foi informado pelo fabricante. A Tabela 8 mostra a quantidade de calor excedente no forno de fusão de cristal, que foi considerado como calor útil para gerar vapor utilizando os dados da Tabela 7.

TABELA 8. Calor excedente.

Parâmetros	Dado	Unidade
Fluxo de Calor	9,373	kW/m²
Taxa de perda de calor pelas paredes do forno	33,53	kW
Energia liberada na Combustão do GLP	79	kW

Taxa proporcional de calor excedente	42,33	%

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A taxa proporcional de calor excedente demonstrada na Tabela 8 é a relação entre o calor perdido pelas paredes e o calor gerado pela combustão do GLP (gás liquefeito de petróleo). Esta relação será válida para condições semelhantes de processo, alteração na energia liberada pela combustão ou aumento na taxa de perda pelas paredes do forno. Desta forma, conforme há redução na temperatura da superfície externa do forno, cresce a taxa de perda pela parede do forno e maior deverá energia liberada pela combustão para manter as condições do processo (KREITH; BOHN, 2011; ÇENGEL; GHAJAR, 2012; INCROPERA et al, 2015). Como a parede externa do forno está em um ambiente fechado, sem fluxo forçado, a transferência de calor que predomina é a convecção natural que depende dos gradientes de temperatura, densidade e forças de empuxo. Desta forma quando adicionado o fluxo da geração do vapor este equilíbrio ira se alterar, porque a temperatura do ambiente irá diminuir e por consequência a temperatura da superfície do forno também (ARAUJO, 2014; BEJAN, 2004). Determinada a taxa de perda pela parede e a necessidade energética da combustão para a condição atual de processo, a Figura 5 mostra a correlação entre a temperatura externa da parede, energia liberada pela Combustão e a perda de calor pelas paredes.

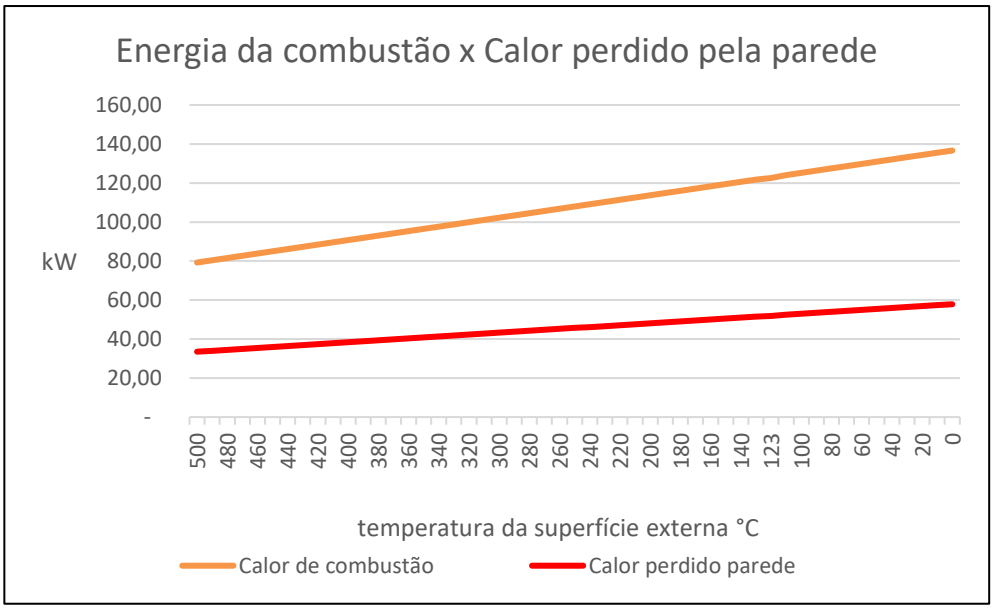

FIGURA 5. Energia da combustão e calor perdido pela parede do forno em função da temperatura da superfície externa. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a definição da amplitude das temperaturas, no lado externo da parede do forno, (Figura 5) levou-se em consideração a temperatura atual de processo (500°C) e a temperatura de 0°C, como

sendo a menor temperatura possível da superfície externa. Com isso, observa-se que o valor máximo do calor perdido será de 57,800 kW quando a temperatura da parede no lado externo estiver em 0°C.

Observando o calor total de ebulição (Q_{total}) na tabela 7 e a máxima capacidade energética perdida pela parede do forno (gráfico 1), quando a temperatura da parede externa estiver em 0°C. Percebe-se que será impossível alcançar o calor necessário para gerar a demanda de vapor requerida pela turbina para atender o consumo em sua totalidade. A Figura 6, mostra que relação entre a taxa de calor disponível e a taxa de geração de energia elétrica, a curva da energia elétrica gerada está no eixo secundário (direita) identificado pela cor vermelha enquanto a curva de calor perdido pelas paredes está no eixo primário (esquerda) identificado pela cor azul.

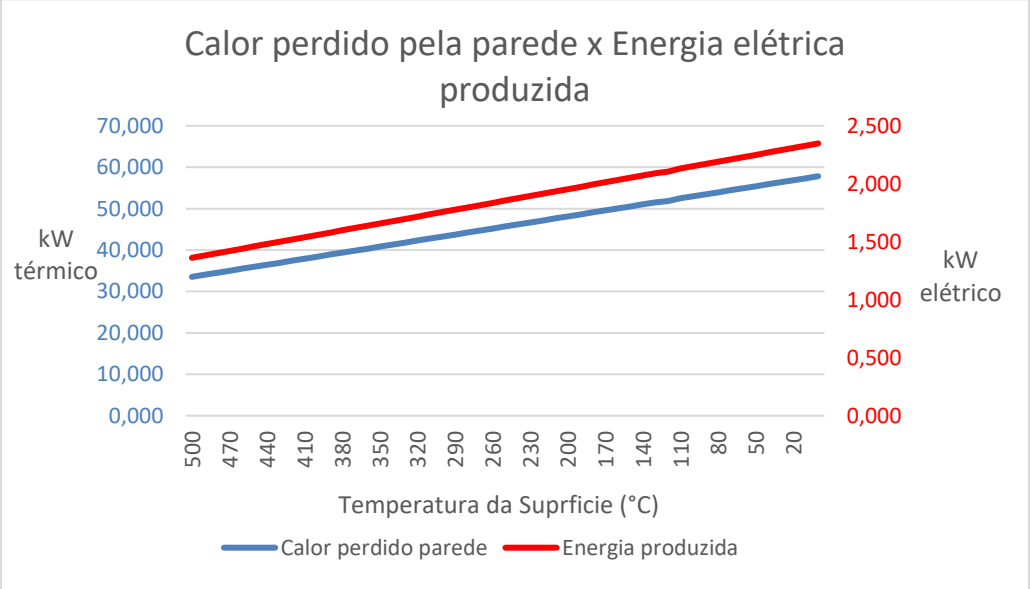

FIGURA 6. Calor perdido e energia gerada em função da temperatura da parede externa. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Considerando que toda a energia perdida pelas paredes do forno seria utilizada para gerar vapor. A Figura 6, mostra que a maior quantidade de energia elétrica possível de gerar é aproximadamente 2,4 kW ou 1688 kWh por mês, quando a temperatura da superfície externa for 0°C; e a menor geração será na condição atual de operação do forno (temperatura de face externa em 500°C), com produção de 1,36 kW ou 979 kWh por mês com base nos dados fornecidos pelo fabricante considerando eficiência do sistema de cogeração.

Conhecida a dependência da temperatura externa da parede do forno em relação a quantidade de calor, o acréscimo na vazão do combustível é a diferença entre o atual consumo e o

consumo conforme a temperatura da parede do forno requerida para a disponibilidade do calor útil necessário. Essa relação é apresentada na Figura 7.

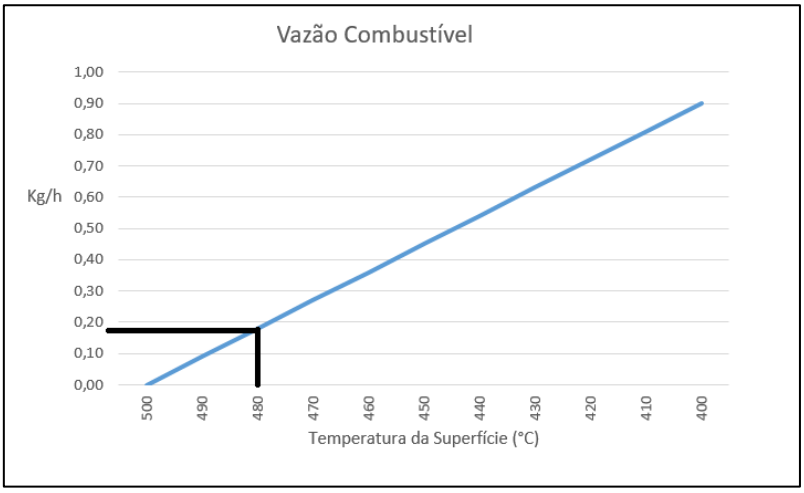

FIGURA 7. Acréscimo Marginal do combustível. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Conforme a Figura 7, quando a temperatura da parede externa estiver na temperatura do ponto de equilíbrio do sistema de cogeração (480°C, que será discutida mais adiante), o acréscimo no consumo do combustível será de 0,180 kg/h. Financeiramente, isto representa um incremento de R$489,00[1] no custo mensal do combustível. A viabilidade do projeto depende, da relação entre a geração de energia elétrica e aumento no custo do combustível. A Figura 8 mostra a relação entre a variação no incremento no custo do combustível e o valor da produção de energia elétrica.

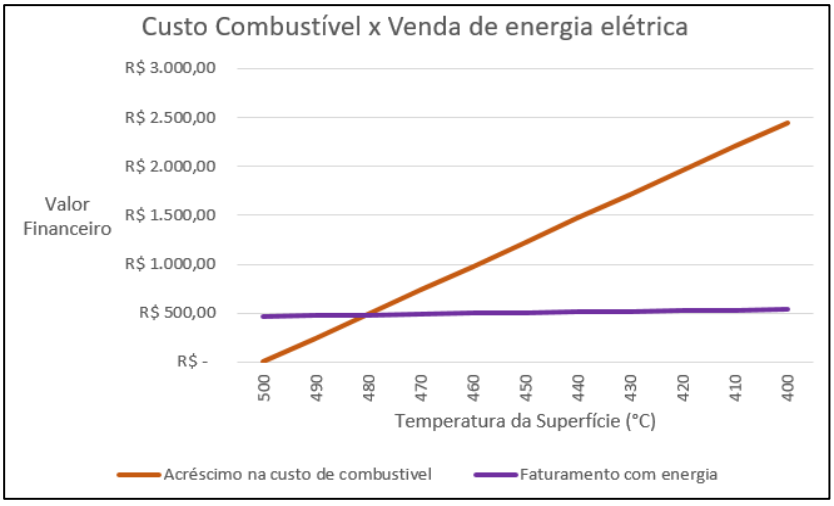

FIGURA 8. Relação entre o aumento do custo do Combustível o faturamento da energia elétrica em função da temperatura externa da parede do forno. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

[1] Valor do custo do GLP R$3,78/kg, data base de novembro/2018.

O ponto onde as duas curvas se cruzam na Figura 8 é o ponto de equilíbrio entre o incremento no custo e a receita gerada pela venda da energia elétrica. Este ponto é onde a temperatura externa está em 480°C, que é muito próximo da condição de operação atual; uma mínima variação na temperatura para menos fará o sistema operar em prejuízo, pois o custo da operação será maior que a receita da cogeração. Como a temperatura não pode ser controlada de uma maneira tão precisa no sistema, a possibilidade de variação é grande.

A Tabela 9 mostra o resultado total da operação considerando a venda de energia elétrica e o aumento no consumo do combustível para o período de um mês, considerando a temperatura da superfície externa da parede do forno igual a temperatura média da água de circulação temperatura de entrada da água no sistema 45°C e temperatura da saída do Vapor 200°C.

TABELA 9. Resultado da operação.

Temperatura da parede externa (°C)	Calor perdido parede (kW)	Acréscimo no custo de combustível (R$)	Energia produzida (kW_e)	Faturamento com energia (R$)	Resultado total (R$)
123	51,85	9.213,41	2,11	726,72	-8.486,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Conforme a Tabela 9 pode-se perceber um prejuízo de R$ 8.486,69, por mês devido ao aumento no custo do combustível. Este valor representa um acréscimo de 98% no gasto com combustível, considerando a despesa atual deste item na empresa em estudo. Andreos (2013) encontrou na sua pesquisa acréscimos de aproximadamente 40% no gasto mensal, abaixo do encontrado neste trabalho, mas ainda alto, o que mostra que o aproveitamento de calor perdido por paredes não é interessante.

Considerando o orçamento prévio de R$112.000,00 para instalação no sistema e considerando que hipoteticamente se consiga manter a variação da temperatura menor que 20°C, o tempo de retorno do investimento seria de aproximadamente 35 anos. Não foram considerados reajustes no valor da energia elétrica, no valor do combustível e juros sobre o capital investido. A energia passível de geração é somente de 1,4kWh sem aumentar o custo da operação, considerando uma redução de somente 20°C na superfície externa do forno, o que é pouco provável devido a redução da temperatura ambiente ocasionada pela circulação da água que tem temperatura média de 123°C.Este número reforça ainda mais a inviabilidade de instalação do sistema.

Estes resultados vão ao encontro de pesquisas recentes que demonstram a ineficiência do sistema de cogeração para situações diferentes de aproveitamento de calor de exaustão ou queima de resíduos de processos. Andreos (2013) mostrou no seu estudo em cogeração nos sistemas de climatização de empresas do setor terciário que a implantação deste sistema é inviável devido ao alto custo dos combustíveis.

A isolação se mostra como uma parte importante na economia e na eficiência da operação o gráfico *sankey* da Figura 9 abaixo mostra a relação entre o calor gerado pela combustão e a forma como é utilizado.

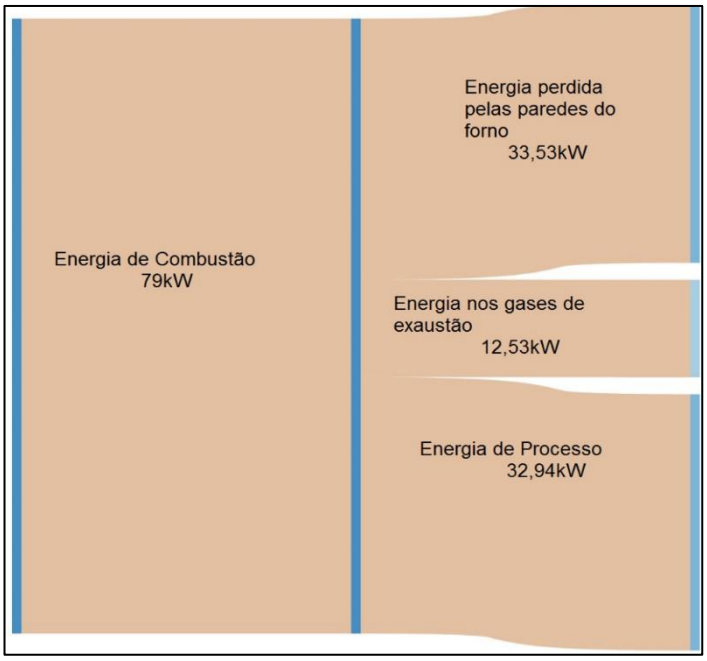

FIGURA 9. Gráfico *Sankey* da condição atual de operação do forno. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando a Figura 9 nota-se que o calor perdido pelas paredes é praticamente igual ao calor consumido pelo processo de fusão do cristal. Já considerando que o forno tem 3 camadas de isolação e um compartimento que isola da variação climática do ambiente, porem esta condição de isolação se mostra muito ineficiente e é mais importante que a aproveitar o calor perdido pelas paredes do forno.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo estudar a possibilidade de aproveitar o calor excedente de um forno de fundição de cristal para gerar vapor e assim geração de energia elétrica, aumentando assim a eficiência global do sistema. Os resultados mostraram que o aproveitamento do calor é inviável pelo baixo fluxo de calor excedente pelas paredes do forno quando comparado com calor necessário para a operação do sistema e o aumento no custo do combustível devido a redução da temperatura da superfície externa da parede. O calor útil disponível pelo sistema é 28 vezes menor que a demanda para gerar o vapor. Também o aumento no consumo do combustível para compensar a redução na temperatura externa do forno foi um fator determinante para a inviabilidade do projeto devido ao alto custo do combustível utilizado para o processo, com isso pequenas variações nas condições do processo resultam em valores importantes no acréscimo do valor do combustível.

Este estudo mostra que é mais salutar à empresa minimizar custos com consumo de GLP minimizando o calor perdido pelas paredes do forno, por exemplo com sistemas de isolação térmica, do que utilizá-lo para geração de energia elétrica. Assim, cabe como estudo futuro avaliar a isolação ótima para o forno definindo: a espessura e o tipo de material isolante a ser usado para minimizar as perdas por convecção, radiação e condução, aumentando a eficiência enérgica do sistema. Também como proposta de trabalhos futuros realizar analise exergética total do forno, para determinar a condição global de operação do forno e possíveis melhorias.

REFERÊNCIAS

ANDREOS, Ronaldo. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do Estado de São Paulo.** 2013. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, 2013.

ARAUJO, Everaldo Cesar da Costa. **Trocadores de Calor.** São Carlos: Editora Universidade Federal de São Carlos, 2014.

BEJAN, Adrian. **Transferência de calor.** São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 540 p.

BRAND, Martha Andreia et al. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de Pinus taeda L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353-360, 2014.

BRASIL. **Micro e Minigeração Distribuída:** Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016. 34 p.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **TERMODINÂMICA.** 7. ed. São Paulo: Amgh Editora Ltda, 2013. 957 p.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 672 p.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S.. **Princípios de transferência de calor.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

NASCIMENTO, Mario Donizeti do; BIAGGIONI, Marco Antonio Martin. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produ-ção de energia em agroindústria seropédica. **Energagric,** [s.l.], v. 25, n. 3, p.104-117, 30 set. 2010.

RIO DE JANERIO. PETROBRAS. . **Gás liquefeito de petróleo:** informações técnicas. 1.2 Rio de Janeiro: Petrobras, 2013.

TOLMASQUIM, Mauricio. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, n. 6-7, p. 179-183, Junho 2000.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluídos térmicos:** água, vapor e óleos térmicos. Curitiba: Hemus, 2002. 319 p.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPq e FAPERGS.