

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA NA SUBSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA COMBINADO DE GERAÇÃO DE VAPOR-VÁCUO POR BOMBAS SECAS¹

Robson Vitor Oliva²
Pedro Magalhães Sobrinho³

Resumo

As tecnologias tradicionais utilizadas em metalurgia secundária das Aciarias para a purificação do aço são o uso de ejetores a vapor combinados ou não com bombas de anel líquido que chegam a 0,67 mbar, removendo gases indesejáveis na composição do aço como N₂, O₂, H₂ e S₂ que causam fragilidades na estrutura. Tem-se aplicado uma nova tecnologia para a geração de vácuo em desgaseificação VD e VOD. O uso de bombas mecânicas secas para essa finalidade só foi possível quando se conseguiu ter uma alta eficiência de vácuo com capacidade de utilização em ambiente agressivos e com contaminação de particulados metálicos. O sistema de bombas secas pode ser montado conforme a necessidade da aplicação, normalmente usa-se conjuntos de três estágios de vácuo, agregando várias tecnologias, sendo a primeira e segunda com rotor Roots, a terceira com rotor garra e para aumentar a capacidade utilizam os conjuntos em paralelo. Neste estudo, comparamos a aplicação dessa nova tecnologia em relação a tradicional, onde se obtém uma redução de 93% do consumo energético e 81% de redução dos custos operacionais.

Palavras-chave: Vácuo; Vapor; Desgaseificação; Aço.

REPLACEMENT OF A COMBINED SYSTEM OF GENERATION OF STEAM-VACUUM PUMPS FOR PUMPS DRY

Abstract

Traditional technologies used in secondary metallurgy of Steelworks for the purification of steel are the use of steam ejectors combined with liquid ring pumps arriving at 0.67 mbar, which can remove unwanted gases in the composition of the steel as N₂, O₂, H₂ and S₂ that cause weakness in the structure. It has been applied a new technology for the generation of vacuum VD and VOD. The use of mechanical pumps dried for this purpose was only possible when it was possible to have a high efficiency vacuum capable of use in aggressive ambient particulate contamination and metallic. The system of Dry Pumps may be mounted as required on the application, usually use three sets of vacuum stages, adding various technologies, the first and second rotor Roots, with the third screw rotor and to increase capacity using sets in parallel. When comparing this new technology compared to traditional obtains a reduction of 93% of energy consumption and 81% reduction in operating costs.

Key words: Vacuum, Steam, Degassing; Steel

¹ Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.

² Engenheiro eletricitista. Eng. Eletricista de Subestação da Novelis. Pindamonhangaba, SP, Brasil.

³ Engenheiro mecânico. Prof. Dr. Departamento de Energia, Unesp, Campus de Guaratinguetá, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um comparativo de custo benefício de um sistema existente de produção de alto vácuo em relação ao sistema de bomba elétrica seca de última geração utilizada no processo de metalurgia secundária nas Aciarias de aços especiais.

O uso de novas tecnologias é uma busca constante que impacta na rentabilidade e no futuro de um ramo de atuação, por esse motivo será demonstrado um comparativo da tecnologia ainda utilizada em comparação com uma nova tecnologia que proporciona um rendimento energético muito melhor, agilidade no processo de fabricação e uma menor contaminação do meio Ambiente.

1.1 Bomba de Vácuo Mecânica Seca

O mecanismo primário ideal de bombeamento para suportar sistemas a vácuo de desgaseificação de aço é um sistema com bomba mecânica seca no qual a poeira do processo pode ser continuamente aspirada sem causar danos significativos. Existem três grandes tipos de bombas secas que podem ser consideradas: garra, parafuso e lóbulo.⁽¹⁾

Na figura 1 tem-se um sistema de desgaseificação composto por três estágios de bombas secas, no primeiro e segundo estágios por bombas de lóbulos (Roots) e o terceiro por bombas tipo garras.

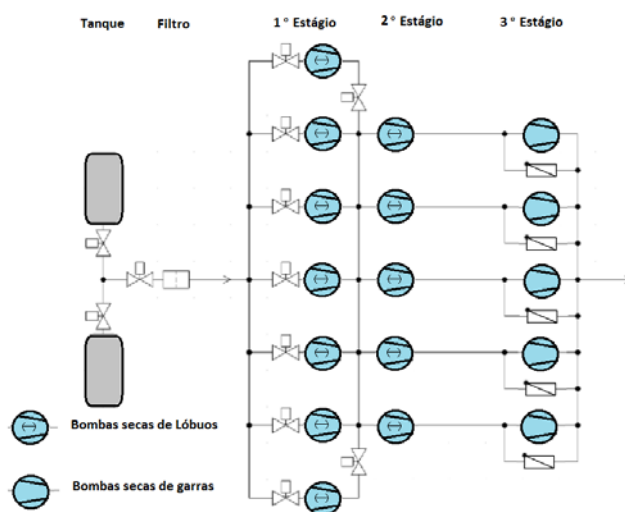


Figura 1: Sistema de desgaseificação com bombas mecânicas.

Inicialmente tem-se os tanques onde se deseja realizar o vácuo, que podem ser um, dois ou mais tanques desde que tenham válvulas para manobrar o respectivo Tanque.

Filtro de pó dedicado a filtrar os particulados metálicos e finos que são retirados da aspiração dos tanques, normalmente utiliza-se nesta aplicação um filtro tipo ciclone sob vácuo.

Primeiro e segundo estágios de bombas Booster com alta capacidade de vazão e boa suportabilidade a poeira e finos metálicos, usam a tecnologia de lóbulos (Roots).

Bombas de lóbulos secas são efetivamente Roots de multi-estágio, portanto têm a vantagem de permitir a passagem de muita contaminação. A compressão é

conseguida através da paragem (uma bomba típica teria três fases sobre a redução de um eixo comum com trocador de calor). A turbulência gerada deve ser capaz de lidar com o pó metálico e finos. Muita experiência foi adquirida em processos sujos e corrosivos com estas bombas e a experiência atual em instalações de desgaseificação de aço com cargas de pó médio. Consumo de energia é normalmente mais elevado para as pressões finais mantidos durante o processamento do desgaseificação a vácuo VD.⁽¹⁾

O terceiro estágio é composto por bombas tipo garras que são compressores verdadeiros e podem transferir o ar aspirado para a atmosfera sem a necessidade de uma refrigeração de escape ou alívio complicada. O rotor sem contato são garras cilíndricas na maior parte da circunferência e possui uma depressão profunda seguida por uma garra saliente. Durante a rotação da garra entra na depressão do rotor de forma coincidente e vice versa. O mecanismo de entrada e escape está nas extremidades da unidade em vez de dispostas verticalmente como ocorre com a bomba de lóbulos.⁽²⁾

À medida que os dois rotores giram, o gás é aspirado através de uma ranhura de entrada que corresponde a cavidade de um dos rotores, continuando o movimento de rotação fecha a entrada, enquanto as garras comprimem o volume retido do gás até que a cavidade do segundo rotor expõe a saída de escape, conforme demonstrado na Figura 2.⁽²⁾

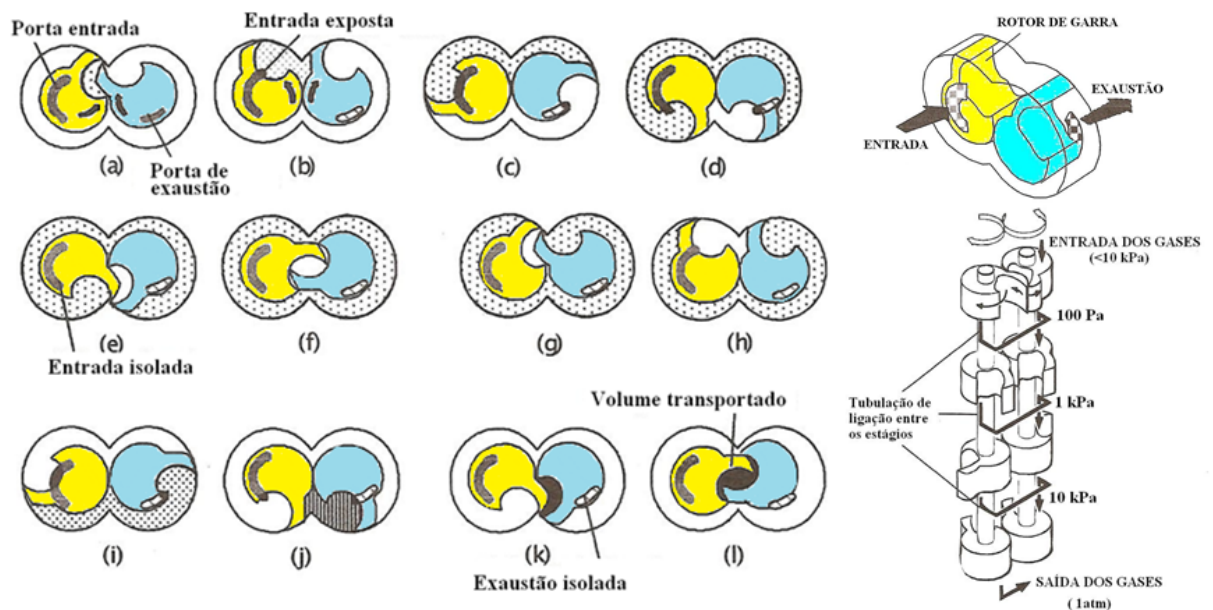


Figura 2: Vários estágios de rotação da bomba de garra. Entrada dos gases posição (a) até (f). Exaustão dos gases posição (g) até (l).⁽²⁾

As bombas de garra secas têm a vantagem de gerar uma turbulência interna muito elevada, altas temperaturas internas e uma boa compressão no gás de passagem. Isto é ideal para a maioria dos tipos de contaminação potencial, mas é particularmente útil quando se considera a probabilidade de poeiras metálicas e vazamentos que entram no mecanismo.⁽¹⁾

A principal vantagem da configuração de garras é a produção de alta relação de compressão, acima de 50 até 100 Pa. Normalmente obtêm 50:1 próximo de 100 Pa, caindo para cerca de 25:1 quando da exaustão para atmosfera.

Muita experiência foi adquirida ao longo dos anos com esta tecnologia, não só em metalurgia, mas também em outros processos empoeirados e altamente

corrosivos, tais como processamento de semicondutores. Foi alcançada uma boa experiência em instalações de desgaseificação do aço, o que demonstra a simplicidade de operação e uma boa confiabilidade.

O consumo de energia também é relativamente baixo para as pressões finais mantidas durante o processamento do VD.

Em locais onde o carregamento de pó é extremo, um sistema de purga de ar automatizado é útil para proporcionar um rendimento elevado momentânea do ar atmosférico durante a operação normal de conduzir o pó arrastado para fora da bomba. Isto é ilustrado em um processo de desgaseificação e descarburção a vácuo VD / VOD.⁽¹⁾

Na Figura 3 tem-se um desenho ilustrativo de um conjunto de bombas utilizado em metalurgia secundária para desgaseificação de aço, o primeiro estágio é composto por bombas de lóbulos de alta capacidade de vazão de $8,3\text{m}^3/\text{s}$ ($30000\text{ m}^3/\text{h}$), o segundo estágio também é compostos por bombas de lóbulos de $3,89\text{m}^3/\text{s}$ ($14000\text{ m}^3/\text{h}$), e o terceiro por bomba tipo Claw de $0,1\text{ m}^3/\text{s}$ ($400\text{ m}^3/\text{h}$), sendo este último responsável por atingir o vácuo final.

Cada conjunto de bomba é montado com as bombas em série proporcionando uma alta capacidade de vazão e obtenção de um vácuo final baixo.

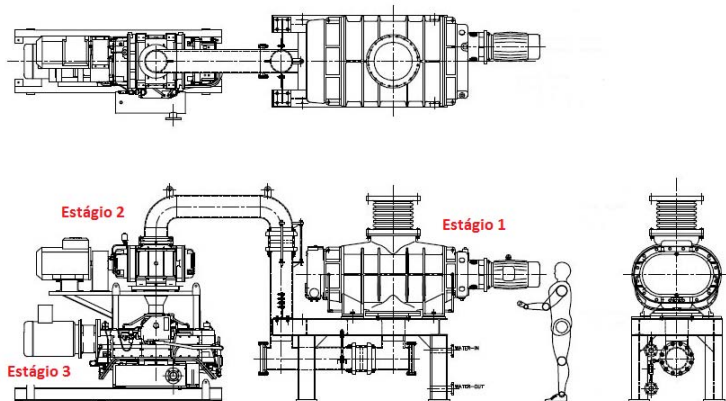


Figura 3: Desenho ilustrativo da montagem mecânica das bombas secas.⁽³⁾

Observa-se na figura 4 que as bombas são relativamente pequenas e favorecem uma montagem simples, comparadas com um sistema com sistemas de bombas ejetoras a vapor.



Figura 4: Instalação das bombas secas em indústrias de aço.⁽³⁾

A capacidade de vazão pode ser aumentada simplesmente aumentando-se os conjuntos bombas de vácuo em função da aplicação.

2. SISTEMA TRADICIONAL DE VÁCUO COM O USO DO VAPOR

2.1 Aspectos Gerais

O sistema de geração de vácuo a partir do uso do vapor é uma tecnologia consolidada no mercado, mas frente às tecnologias mais atuais ela é muito onerosa financeiramente como ambientalmente.

2.2 Sistema Atual de Produção de Vácuo

O processo de obtenção de vácuo atual possui várias etapas de transformação de energia conforme a Figura 5, cada uma das etapas tem seus insumos energéticos e suas perdas naturais, diminuindo o rendimento energético do sistema.

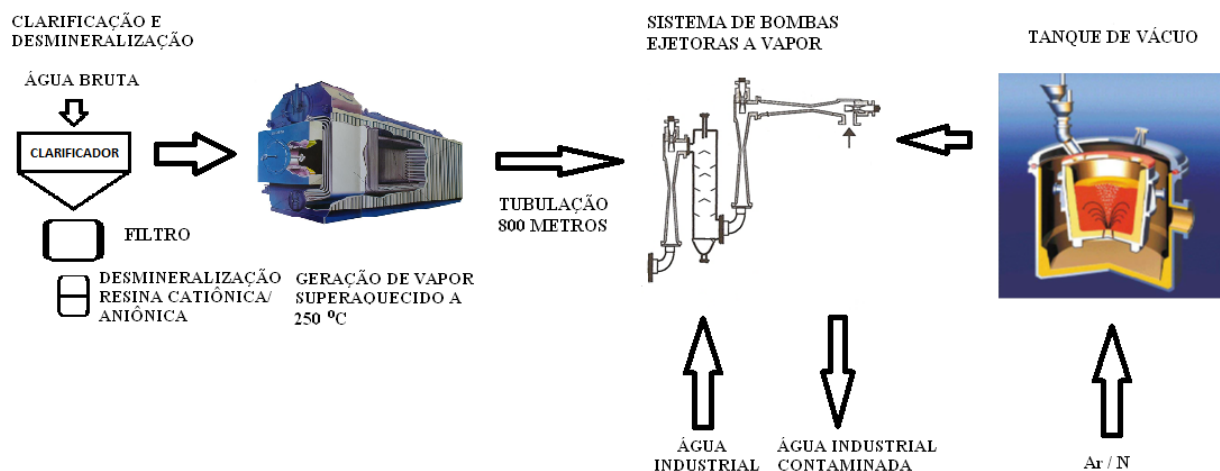


Figura 5: Processo simplificado do sistema em estudo.

Podemos separar o processo em: Clarificação da água, Desmineralização, Geração de vapor, Transporte do vapor, Bombas ejetoras a vapor, Tanques de vácuo, Tratamento da água industrial.

Para a indústria siderúrgica a obtenção do vácuo é um processo oneroso e representa um valor significativo no custo de transformação do produto, o principal insumo do custo de transformação é o Gás Natural utilizado na caldeira.

A operação dos equipamentos demanda uma mão de obra qualificada, horas de treinamento e reciclagem constante, a manutenção é muito cara devido a alta temperatura, equipamentos dedicados e peças fabricadas especialmente para aquela aplicação, por se tratar de caldeira é necessário atender legislação pertinente NR-13 e executar periodicamente as inspeções estruturais dos vasos e da fornalha da caldeira, sendo uma atividade de alto risco e é obrigatório acompanhamento em tempo integral de operadores qualificados.

2.2.1 Sistema de bombas ejetoras a vapor

O sistema de bombas ejetoras tem a premissa de atingir 1 torr em no máximo 7 minutos partindo de 1 atm e permanecendo por mais 10 minutos, condição necessária para o processo de desgaseificação.

Neste sistema temos algumas desvantagens significantes:

- Perdas de eficiência energética devido à necessidade de iniciar o vácuo na pressão atmosférica, perdendo toda essa energia no final de cada ciclo, característica do sistema de ejetores atual.
- Alto consumo de água usada nos ejetores combinado com os condensadores do vapor superaquecido necessita consumir 0,36 m³/s (1300 m³/h) de água industrial a 30°C para aumentar a velocidade de arraste do venturo,
- Perda de eficiência do sistema de vácuo com a elevação da temperatura da água dos ejetores e condensadores.
- Contaminação da água pela sujeira do gás aspirado da panela que contém o aço derretido a 1600° C, gerando uma grande quantidade de efluente contaminado.

2.2.2 Consumo específico do sistema de geração de vácuo

O sistema consiste na operação de duas caldeiras idênticas de 20kgf/cm² e 18t de capacidade de geração de vapor superaquecido a 250° C simultaneamente, fornecendo vapor para um sistema de ejetor de vapor para a produção de vácuo, usado no sistema de desgaseificação do aço.

2.2.3 Consumo específico do sistema de geração de vapor

Foi realizado o acompanhamento do consumo de gás natural da caldeira durante os anos de 2009 a 2011 onde obtivemos os consumos normalizados conforme Tabela 1.

Tabela 1: Consumo de gás natural da Caldeira

Caldeira		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2009	kNm ³	259	252	416	381	353	311	424	473	493	498	427	295
2010	kNm ³	438	456	529	542	498	486	517	492	461	413	272	318
2011	kNm ³	386	382	414	481	502	464	504	535	491	511	470	502

O ciclo de funcionamento do sistema de vapor que opera 15 minutos a cada hora por ciclos regulares, totalizando 22 ciclos de operação do sistema de vapor por dia, partindo de zero tonelada de vapor e imediatamente após a abertura da válvula sobe para próximo de 14 t/h para os ejetores e mais 4 t/h para o desaerador permanecendo por 15 a 20 minutos e retornando a zero no final do ciclo de desgaseificação do aço.

A caldeira tem sua eficiência comprometida devido ao regime de trabalho que não é contínuo, fazendo a caldeira ter choques térmicos a cada partida do sistema de vácuo operando com capacidade máxima durante os cinco primeiros minutos até atingir o vácuo menor que 67 Pa (0,5 torr) e manter por 10 minutos para remoção dos contaminantes do aço e após o término da desgaseificação ficando na potência mínima ou desligada para não elevar a pressão do vapor.⁽⁴⁾

Quando ajustamos a relação ar/gás no queimador é para a condição de 100% da carga e na condição de baixa carga ou nenhuma o queimador fica com um excesso de ar e a eficiência fica comprometida.

Como o regime de utilização durante o mês tende a se manter constante é possível buscar um acompanhamento da eficiência e maximizar o ajuste de relação ar/gás.

Na Figura 6 é possível observar que nos últimos três anos o consumo específico da caldeira tem se mantido em valores próximos, demonstrando uma regularidade tanto do processo como no consumo específico da caldeira.

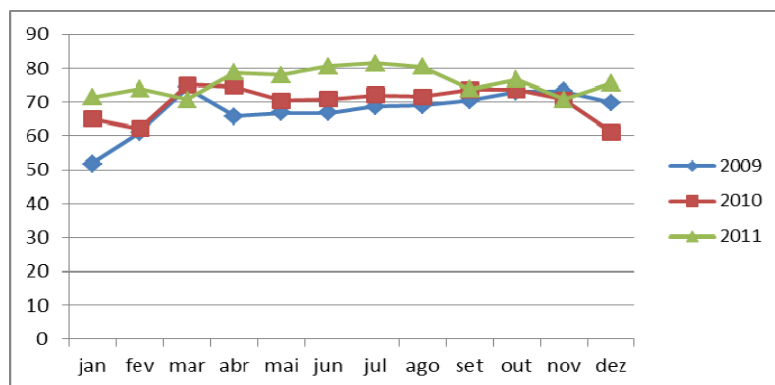


Figura 6: Curva de consumo específico da caldeira Nm³/t vapor

Na Figura 7 são apresentadas as curvas de consumo energético onde se observa que temos um consumo energético elevado para o seu objetivo que é produzir de forma indireta o vácuo necessário no processo em comparação com sistema misto de ejetor a vapor com bombas de anel líquido ou mecânicas.

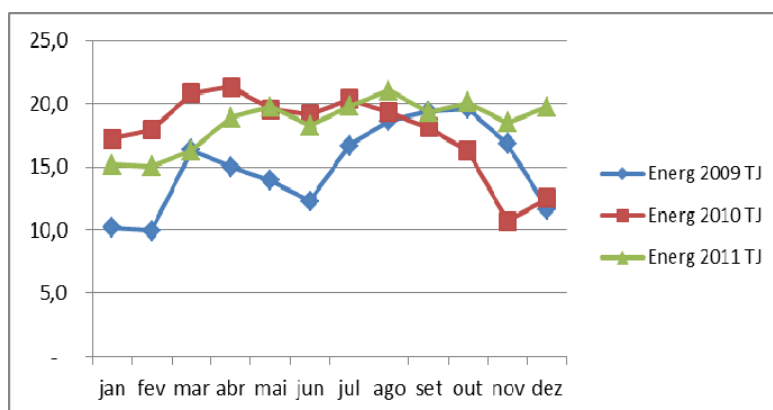


Figura 7: Consumo energético da caldeira TJ/mês.

2.2.6 Aspectos Ambientais

- **Contaminação da água**

O arraste de pó para dentro dos ejetores a vapor e conseqüentemente para a água industrial é de 1-2 kg Mn/Cr/Fe⁽⁵⁾ de pó por semana, necessitando de uma estação de tratamento de água para realizar a remoção desses contaminantes, sendo extremamente onerosa sua instalação, manutenção e operação.

O sistema de bombas ejetoras consome nos condensadores 0,36 m³/s (1.300 m³/h) de água industrial quando em funcionamento elevando em 10°C a temperatura, que precisa ser resfriado e novamente bombeado.

- **Contaminação do ar**

Com a desativação das caldeiras a geração de gases como NO_x e CO_x resultado da combustão do Gás Natural deixam de ser gerados, eliminando esse contaminante do ar.

2.2.8 Insumos energéticos na geração de vácuo com ejetor a vapor

A Figura 8 mostra o fluxo de energia e insumos necessários para a produção de vácuo a partir do vapor, onde podemos dividir o sistema em Tratamento de água para caldeira, caldeira, transporte do vapor, sistema de geração de vácuo através dos ejetores e propriamente a central onde é utilizado o vácuo.

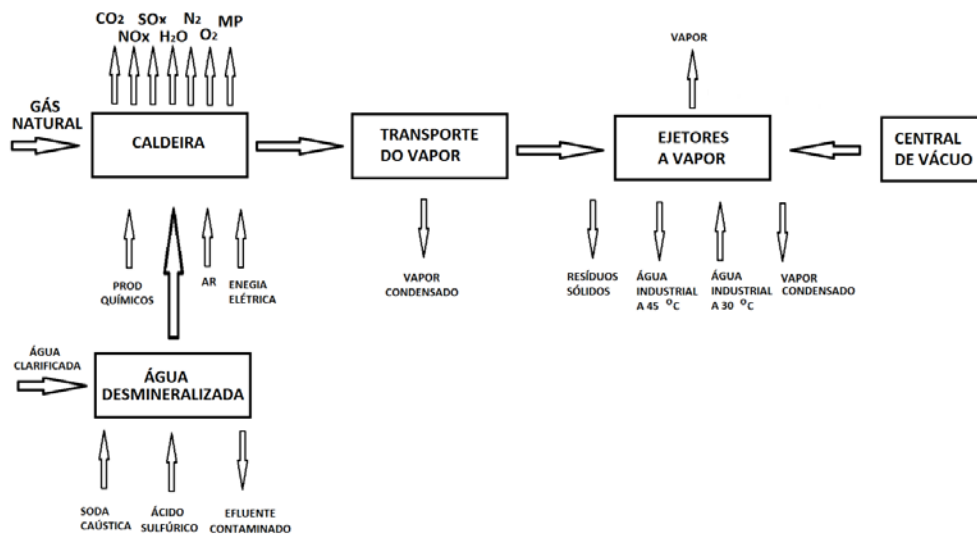


Figura 8: Fluxo de energias para produção de vácuo a partir de vapor.

2.3 Sistema de Vácuo com Bombas Secas

O sistema proposto na Figura 9 prevê a substituição do sistema existente com as mesmas características de capacidade e vácuo final.

Atingir vácuo final abaixo de 1 torr (0,67 mbar) em até 6 minutos.

Para o dimensionamento do sistema foi considerado a entrada de ar falso em todas as vedações, visto que o processo siderúrgico é uma aplicação agressiva com equipamentos pesados, grandes volumes e muita sujeira e resíduos.

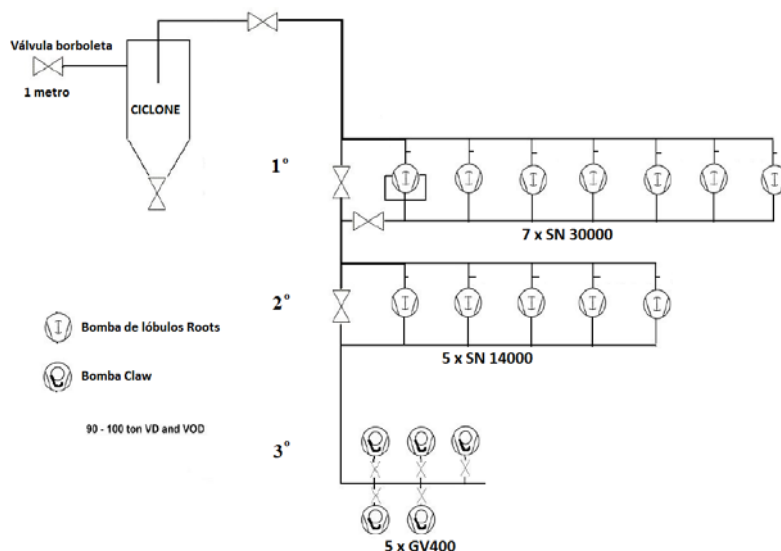


Figura 9: Sistema de vácuo para VD de 100t

2.3.4 Utilidades

- **Consumo de água industrial**

Cada conjunto de bombas de 3 estágios usa 2,6 m³/h de água industrial para refrigeração interna sendo no primeiro estágio 6+1 (Bomba reserva) mais o segundo estágio 4+1 (Bomba reserva), o terceiro estágio não utiliza água, totalizando

10 bombas em uso com um consumo 26 m³/h em sua condição máxima de operação e 15 m³/h de consumo médio.

A tubulação de refrigeração da tubulação do Forno Panela consome 125 m³/h em condição normal de operação. Como está sendo comparado sistema com a mesma capacidade e finalidade deve ser considerada apenas o consumo de água dos conjuntos de bombas.

- **Consumo de energia elétrica**

Cada conjunto de bombas consomem 935 Kw conforme Figura 9, operando com apenas um único conjunto para o sistema de metalurgia secundária FP e com dois conjuntos para SD.

2.3.5 Consumo específico do sistema proposto

O consumo previsto de energia elétrica para o sistema de bombas mecânicas é 0,9 kW/tonelada de aço líquido,⁽⁴⁾ considerando o mesmo regime de trabalho.

3 RESULTADOS

3.1 Custo Operacional do Sistema Atual

Observamos na Tabela 2 que o custo mais significativo é com gás natural utilizado na caldeira representando 7,63 R\$/t, tem-se um indicativo que os esforços para melhorar a eficiência energética dos equipamentos serão pouco significante perto do custo do gás natural.

Tabela 2: Custo operacional do sistema existente

Descrição	Quant			Quant / mês	GJ / mês	Custo Anual R\$	R\$/t
Energia elétrica							
Ventilador Caldeira	2	25	cv	31.356	113	67.658	0,10
Bombas de recirculação de água Caldeira	1	100	cv	62.712	226	135.315	0,20
Gás Natural			m ³	472.343	18.589	5.080.786	7,63
Tratamento de água Desmi	1	10	cv	6.271	5	53.931	0,08
Produtos químicos para Caldeira	2	1	cv	1.254	1	32.706	0,05
Manutenção				14.082		168.984	0,25
Inspeção anual				25.500		25.500	0,04
Mão de obra dos operadores				32.552		390.626	0,59
Tratamento de água industrial							
Bombeamento recalque 1300 m ³ /h	2	250	cv	78.391	282	14.095	0,02
Bombeamento Recirculação 1300 m ³ /h	1	350	cv	54.873	198	49.187	0,07
Manutenção do sistema de Desgaseificação				10.000		120.000	0,18
Total					19.414	6.138.788	9,21

3.2 Custo Operacional do Sistema Proposto

Sistema de bombas

- Potência instalada, dois conjuntos de 985 kw
- Consumo de energia 0,9 kwh/ton aço líquido
- Água de resfriamento 15 m³/h para cada conjunto de bombas
- Consumo de nitrogênio 15 Nm³/h para cada conjunto de bombas

Fazendo um comparativo de gastos com energia, insumos e mão de obra obtêm o resultado que está na tabela 3, indicando um custo operacional 39 vezes menor para a mesma condição operacional, representando um resultado excelente em consideração a retorno financeiro.

Tabela 3: Custo operacional do sistema proposto

Descrição	Quant	Potência	Quant / mês	GJ / mês	Custo Ano R\$	R\$/t
Energia elétrica						
Bombas mecânicas secas de vácuo para VD	1	985 kw	325.050	1.171	701.363	1,05
Bombas mecânicas secas de vácuo para SD	1	985 kw	63.040	227	136.022	0,20
Tratamento de água industrial						
Bombeamento de água industrial recalque	2	50 kw	72.000	259	155.355	0,23
Bombeamento de água industrial Recirculação	1	50 kw	36.000	130	77.678	0,12
Manutenção do sistema de Desgaseificação ¹			5.000		60.000	0,09
Nitrogênio 15 m ³ /h	1	15 m ³	10.800		7.128	0,01
Total				1.787	1.130.418	1,71

¹(TENGLER, 2004)⁽⁵⁾

4 COMPARATIVOS DAS TECNOLOGIAS

4.1 Comparativo Financeiro

Tabela 4: Comparativo do custo operacional das bombas a vapor e mecânicas

Descrição	Bombas a Vapor R\$/t	Bombas Mecânicas R\$/t
Energia elétrica		
Ventilador Caldeira	0,10	-
Bombas de recirculação de água	0,20	
Bombas elétricas secas		1,26
Gás Natural	7,63	
Tratamento de água Desmi	0,08	
Produtos químicos para Caldeira	0,05	
Manutenção	0,25	0,09
Inspeção anual	0,04	
Mão de obra dos operadores	0,59	
Tratamento de água industrial		
Bombeamento de água industrial recalque 1.300 m ³ /h	0,02	
Bombeamento de água industrial Recirculação 1.300 m ³ /h	0,07	0,01
Bombeamento de água para o ciclone		0,35
Manutenção do sistema de Desgaseificação	0,18	
Nitrogênio		0,01
Total	9,21	1,71

Através da Tabela 4 obtêm-se o custo operacional do sistema proposto de 1,71 R\$/t, indicando um resultado excelente em comparação com o consumo operacional do sistema existente de 9,21 R\$/t, representando um custo operacional 5,4 vezes menor.

4.2 Comparativo Energético

Considerando o aproveitamento energético demonstrado na tabela 5 demonstra-se que o sistema proposto gasta apenas 8,3 % da energia do sistema atual.

Tabela 5: Comparativo energético do consumo mensal

Sistemas de vácuo	Consumo Energético
Ejetor a vapor	19.414 GJ
Bombas mecânicas	1.787 GJ

A diferença apresentada na tabela 5 demonstra que o sistema proposto oferece um ganho energético excelente frente ao atual, por ser mais simples com apenas um sistema convertendo a energia elétrica em sucção de ar e consecutivamente vácuo.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um estudo de custo benefício de um sistema existente de produção de vácuo em comparação com o sistema de bomba de vácuo mecânica seca de última geração que começou a ser comercializado no mundo a partir da última década para a fabricação de aço de construção mecânica.

Conclui-se que o sistema de bomba seca tem muitos benefícios em relação ao sistema antigo, tanto energético, financeiro e ambiental.

Considerando os impactos ambientais obtêm-se a eliminação da contaminação de sólidos no sistema de tratamento de água e geração de gases da combustão na operação da caldeira.

Considerando os impactos energéticos, obtêm-se a eliminação da perda de carga no transporte do vapor da Utilidade até a Aciaria, redução do consumo de energia elétrica com o desligamento das bombas de água industrial e do ventilador da torre de resfriamento, melhor aproveitamento energético porque o sistema proposto permite que a tubulação permaneça sob vácuo mesmo quando o sistema está desligado e no sistema de ejetores todas às vezes o vácuo tem que começar de 101 kPa (1 atm), e uma das características da caldeira é que ela não pode ser desligada ou esfriada continuamente porque os tubos tenderiam a rachar com as variações de temperatura, no caso do sistema novo é só desligar as bombas, implicando em uma redução de 91,7 % no consumo energético,

Considerando os impactos financeiros obtêm-se a redução de R\$ 6,1 milhões por ano com o consumo de Gás Natural, remanejamento de mão de obra dos operadores especializados e eliminação dos custos de manutenção da Caldeira, com uma redução de 81,4% de redução nos custos operacionais do sistema de vácuo, um pouco abaixo dos 97% que a Edwards divulgou para um sistema similar (Edwards,2012c), mas ainda assim é um excelente resultado.

Oportunidade de ganhos com recuperação dos créditos de carbono devido a eliminação da queima de combustível fóssil que totalizam retorno de 198 mil reais por ano.

Agradecimentos

Agradeço aos profissionais técnicos que me auxiliaram na obtenção das informações necessárias, ao Prof Pedro Magalhães e a todos que indiretamente ou diretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G. Recent Operating Experience with Dry Running Vacuum Pumps on Vacuum Degassing and Vacuum Oxygen Decarburization systems. ISSTech 2003: Conference Proceedings: Electric Furnace, Steelmaking, 2003. 895-909p.
- 2 HARRIS, N; Modern Vacuum Practice. 3. ed. Glasgow: Bell and Bain Ltda, 2005. 457p.
- 3 EDWARDS. 2012a. Vacuum and pressure for industrial and process applications. Disponível em:
<http://www.edwardsvacuum.com/asia/biofuels/pdf/BOC_Edwards_Industrial_Brochure.pdf>. Acesso em 24 nov. 2012.
- 4 EDWARDS. 2012c. Mechanical Vacuum Pump System for Steel Degassing. Disponível em:
<https://www.edwardsvacuum.com/uploadedFiles/Home/Markets_Served/Steel_Degassing/Steel%20Degassing%20application%20note%20P10008895B.pdf>. Acesso em 24 nov. 2012.
- 5 TENGLER, A. Maintenance Issues With Traditional and Advanced Vacuum Pump Technology: AIMCAL Fall Conference & 18th International Conference on Vacuum, 10., 2004, Charleston. SC USA.