

# REDUÇÃO NO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA ELÉTRICA (KWH/T) NO PROCESSO DE FILTRAGEM NA ÁREA DE MINERAÇÃO

Douglas Rômulo Cruz Fernandes <sup>(1)</sup>

Hermes Dias Godinho <sup>(2)</sup>

Lucas Costa Brito <sup>(3)</sup>

Jorge Nei Brito <sup>(4)</sup>

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o monitoramento dos principais parâmetros de operação da fase de filtragem utilizando a filosofia PIMS - Process Information Management Systems (sistema InfoPlus). Os resultados confirmam que foram identificadas as lacunas que prejudicavam o rendimento da filtragem e que, conseqüentemente, aumentavam significativamente o consumo específico de energia. Após análise dos dados obtido pelo sistema InfoPlus foi possível traçar uma estratégia de redução do consumo específico de energia elétrica do processo de filtragem. Esta estratégia diminuiu o custo de produção e aumentou os lucros da empresa.

**Palavras-chave:** Consumo específico; Filtragem; Vácuo.

## ABSTRACT

The monitoring of the main operating parameters of the filtering phase using the PIMS - Process Information Management System (InfoPlus system) philosophy is presented. The results confirm that gaps were identified that hampered filtration efficiency and consequently significantly increased specific energy consumption. After analyzing the data obtained by the InfoPlus system, it was possible to outline a strategy to reduce the specific electric energy consumption of the filtering process. This strategy reduced the cost of production and increased the company's profits.

**Keywords:** Specific consumption; Filtering. Vacuum.

(1) **Douglas Rômulo Cruz Fernandes.** Engenheiro Mecânico Vale S.A. Mestrando em Engenharia de Energia | CEFET-MG Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. MBA em Engenharia de Manutenção e Gestão de Ativos | IESAE - Instituto de Ensino Superior Albert Einstein. Graduação em Engenharia Mecânica | UNIPAC - Universidade Presidente Antônio Carlos. <http://lattes.cnpq.br/1342901940688153>. [douglasrcf@hotmail.com](mailto:douglasrcf@hotmail.com).

(2) **Lucas Costa Brito.** Consultor DYNAMIC Services Consultoria Ltda. Mestrando em Engenharia Mecânica | UFU (Universidade Federal de Uberlândia). Eng. Mecânico | UFSJ (Universidade Federal de São João del-Rei) e *Lakehead University | Thunder Bay* - Ontario, Canada. Sócio ABRAMAN | Matrícula: 10045. Diretor Técnico Adjunto II da FENEMI (Federação Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial). <http://lattes.cnpq.br/9519306355864837>. [lucas.brito@dynamic.services.com.br](mailto:lucas.brito@dynamic.services.com.br).

(3) **Hermes Dias Godinho.** Coordenador do MBA Engenharia de Manutenção | IESAE - Instituto de Ensino Superior Albert Einstein. Eng. Industrial Mecânico pela UFSJ. Pós-graduado em Engenharia de Manutenção e Engenharia de Produção pelo ICAP. MBA Gestão Estratégica | Pitágoras. Expertise em PCM, TPM, RCM, Auditorias de Manutenção, Planejamento Grandes Paradas e Lean Manufacturing. Tutor em EAD pela UFF. <http://lattes.cnpq.br/1443613510030566>. [hermes@iesae.com.br](mailto:hermes@iesae.com.br).

(4) **Jorge Nei Brito.** Sócio da ABRAMAN | Matrícula: 5688. Pós-Doutor e Doutor em Eng. Mecânica | UNICAMP. Mestre Eng. Mecânica | UFU. Eng. Mec. PUC-MG. Professor TITULAR UFSJ. Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica e Gep\_LASID. Primeiro Vicepresidente COPIMERA. <http://lattes.cnpq.br/8160466619165597>. [brito@ufsj.edu.br](mailto:brito@ufsj.edu.br).

## 1. Introdução

A "Filtragem" é um processo que consiste na separação do sólido/líquido, onde o principal responsável por esse processo é o vácuo. A palavra vácuo é utilizada na linguagem diária com diferentes sentidos, como, por exemplo, vazio ou espaço onde não possui moléculas de ar.

Na antiguidade (322 - 384 a C), Aristóteles definiu o vácuo como sendo o "vazio", ou uma espécie de "espaço privado de corpo" como uma impossibilidade lógica da natureza, uma vez que pesquisadores antigos acreditavam na matéria como uma substância contínua (SAUNDERS & BROWN, 2002). Mas para ter um espaço onde não tenha ar é necessário utilizar meios que possa retirar parte dessa matéria, visto que no século XVII com o uso mais intenso da experiência como auxiliar do raciocínio científico que dois problemas começaram a serem devidamente equacionados: a natureza do ar e a possibilidade de produzir uma região com espaço sem ar ou, pelo menos, com uma quantidade muito pequena de ar (STEMPINIAK, 2002).

Segundo Ryans & Roper (1986), Otton Guerick contribuiu para o início da engenharia da tecnologia do vácuo em 1654 através da criação da primeira bomba de vácuo no tão famoso experimento dos hemisférios de Megderburg.

GAMA (2002), afirma que foi através de uma bomba de vácuo que Guerick retirou uma quantidade parcial de ar existente de dentro dos dois hemisférios de 119 cm de diâmetro que estavam selados com tiras de couro e molhadas com mistura de cera e terebintina.

Uma "Usina de Pelotização" possui vários processos para a produção de pelotas. Um deles é "Processo de Filtragem", que utiliza uma bomba rotativa para retirar o ar do sistema e formar uma diferença de pressão (vácuo ideal) para a separação do sólido/líquido. Para realizar o movimento da bomba é necessário utilizar motor elétrico de alta potência acoplado a um redutor de velocidade, sendo o consumo energético, em média, de 480 KWh por bomba. Para produzir, anualmente, quatro milhões de toneladas de pelotas, o que representa aproximadamente 10% da produção de pelotas da Vale Brasil, é consumido 4,32 KWh/t apenas no "Processo de Filtragem a Vácuo". Essa é a terceira maior fonte de consumo de energia em uma "Usina de Pelotização", sendo o de R\$ 293.177,13 o custo médio por mês.

Para reduzir o consumo específico de energia elétrica "Processo de Filtragem a Vácuo", foi necessário realizar um estudo detalhado, listando todos os problemas que prejudicavam o rendimento da filtragem.

Com o cenário de crise do minério de ferro ocorrida no ano de 2016, o que levou a significativa demanda deste produto, os gestores da "Usina de Pelotização" apresentaram uma estratégia de redução do custo de produção para que a empresa se mantivesse competitiva no mercado. Essa estratégia implicou em identificar oportunidades de melhorias que pudessem reduzir os custos de produção e, conseqüentemente, aumentar os lucros. Desta forma, estima-se que reduzindo o consumo específico de energia elétrica do "Processo de Filtragem a Vácuo" pode-se ter uma economia anual favorável, ajudando assim a aumentar os lucros da empresa.

Analisando os últimos oito anos, de acordo com os dados apresentados na Figura 1, percebe-se que o preço do minério de ferro manteve-se muito abaixo do que era praticado no período entre meados de 2010 e fim de 2013. A baixa do preço do minério de ferro nos últimos anos vem impactando na queda dos lucros das empresas mineradoras, saindo de valores como US\$ 190 por tonelada, atingidos no ano de 2011, para US\$ 70 por tonelada em 2018.



Figura 1. Preço do minério de ferro (Fonte: //www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/Iron-Ore-Indices.aspx Metal Bulletin: www.mbioi.com).

## 2. Filtragem a Vácuo

A "Filtragem de Fábrica", Vale S.A., é composta por dez filtros de discos, seis bombas de vácuo, além do conjunto de tubulações com separados de filtrado e perna barométrica que forma o sistema de vácuo. Na Figura 2 tem-se a tela do que representa o sistema de vácuo da filtragem de Fábrica.

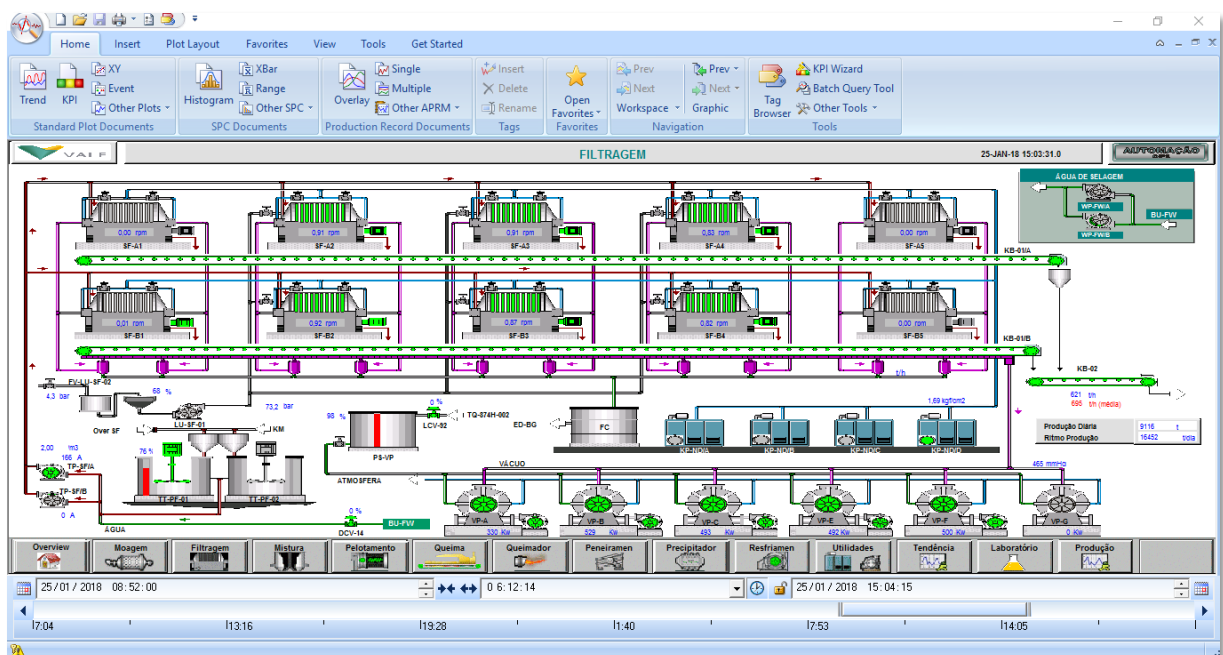


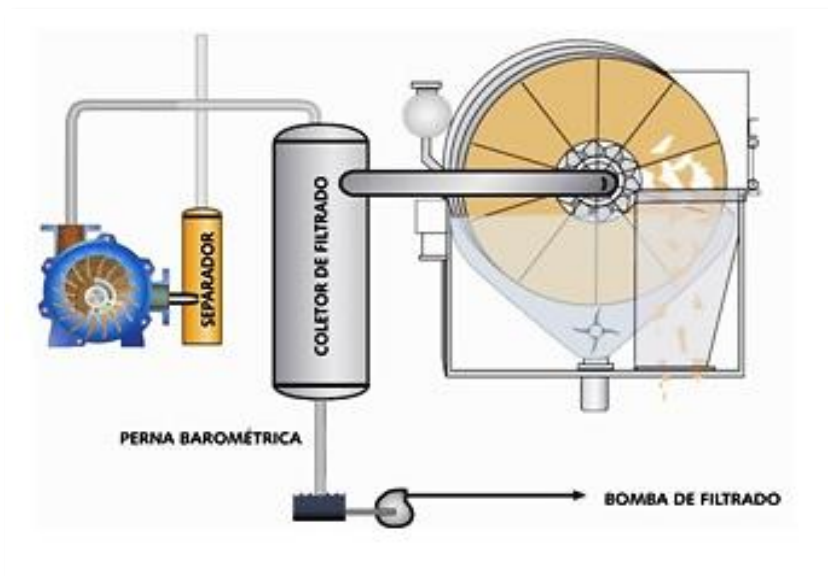
Figura 2. Tela "Infoplus" Filtragem Mina Fábrica. Fonte: Sistema InfoPlus Vale.

Em uma "Usina de Pelotização", onde o produto é a pelota destinada a produção de aço, existe vários tipos de processos. Um deles é a "Filtragem a Vácuo", onde o consumo com energia elétrica é bem elevado devido à utilização de bomba rotativa (bombas de vácuo). Pode-se considerar que a "Filtragem" é a operação unitária responsável pelo terceiro maior consumo de energia elétrica de uma "Usina de Pelotização", atrás apenas das operações de "Queima" e "Moagem". Seu consumo médio mensal é de aproximadamente 1,6 GWh, sendo que as bombas de vácuo são responsáveis aproximadamente 80 % deste consumo.

### 3. Filtro de Disco

O "Filtro de Disco" consiste em um tambor rotativo horizontal que gira lentamente. Sua superfície cilíndrica é construída com chapa metálica e dividida em diversas secções que formam câmaras de vácuo ligadas ao eixo por canalizações onde é feita a aspiração do filtrado. Os filtros rotativos podem operar tanto como filtro rotativo a vácuo quanto como filtro rotativo pressurizado.

Conforme manual da NASH (2011), a separação do sólido/líquido realizada no processo de Filtragem utilizando filtro rotativo a vácuo passa por três passos básicos de operação: formação da torta, secagem da torta e saída de torta, Figura 3.



**Figura 3.** Layout de "Filtragem a Vácuo". Fonte: [http://www.gdnash.com.br/Newsletter/filtro\\_a\\_disco.html](http://www.gdnash.com.br/Newsletter/filtro_a_disco.html).

### 4. Bomba de Vácuo

A bomba de vácuo tem por finalidade criar uma diferença de pressão dentro da tubulação e câmara de vácuo em relação ao coletor de aspiração da bomba, causando um desequilíbrio de pressão no sistema, ou seja, na entrada da bomba existe uma pressão menor que em qualquer ponto da tubulação e câmara de vácuo (MOUTINHO *et al.*, 1980). Esta diferença de pressão promove um fluxo de gás contido no sistema, no sentido de evacuar a quantidade de gás proporcional a esta diferença criada pela bomba. Conseqüentemente, quanto maior a diferença de pressão menor será a quantidade de gás existente dentro do sistema de vácuo (PAIVA, 2010).

A tubulação também tem um papel muito importante no sistema, além de conectar a bomba de vácuo na câmara, cria todo um circuito interligando os dispositivos inerentes do sistema (O'HANLON, 2003; CHAMBERS *et al.*, 1998).

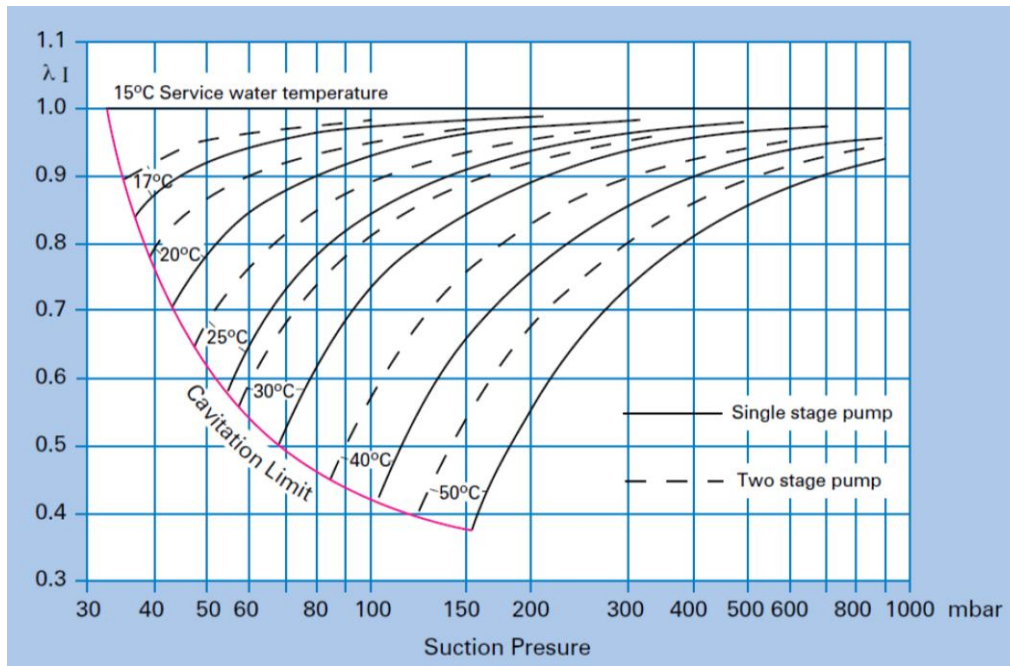
Segundo o Manual IMBL de bomba de vácuo, o princípio de funcionamento de uma bomba de vácuo baseia-se na existência de câmaras distribuídas num rotor posicionado excentricamente a um corpo cilíndrico denominado carcaça ou corpo. Os espaços entre as palhetas fixas do rotor, a carcaça e as tampas laterais formam câmaras que são preenchidas por líquido (líquido compressor ou de selagem), que sob a ação da força centrífuga imposta pela rotação do rotor provoca a variação do volume útil de cada célula em virtude do deslocamento do líquido contra a carcaça.

Com o movimento de rotação do rotor, o líquido compressor impulsionado contra a parede cilíndrica interna do corpo, adquire o formato de um anel, de onde vem à denominação "Bomba de Vácuo de Anel Líquido". Internamente a Bomba de Vácuo forma duas zonas de ações distintas onde ocorre a aspiração dos gases na zona de Expansão e a expulsão dos mesmos na zona de compressão respectivamente. Os gases atingem as câmaras do rotor, passando pelas janelas maiores dos Cones seguindo pelas janelas menores dos mesmos até a saída da bomba de vácuo. O líquido compressor ou de selagem passa pelos cones, sendo introduzido através das conexões existentes nas tampas laterais do equipamento. Pelos bocais de entrada das tampas laterais o ar, gases ou vapores ingressam na bomba de vácuo sendo expulsos através dos bocais de descarga (saída) juntamente com o líquido compressor.

Com a aspiração do ar do sistema pela bomba inicia-se a formação de vácuo, onde a pressão dentro da tubulação pode chegar dependendo da altitude onde se encontra a instalação a cerca de 620 mmHg. Com a diferença de pressão do sistema a polpa de minério de ferro (sólido/líquido) inicia a separação atravessando o tecido filtrante, onde a partícula sólida aderem ao meio filtrante passando apenas o líquido.

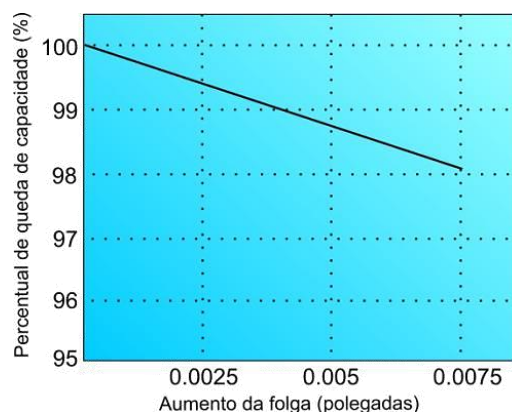
A capacidade de aspiração (vazão volumétrica) da bomba de vácuo é influenciada pela temperatura, quantidade de água de alimentação para criação do selo hidráulico e folga existente entre rotor e cabeçote da bomba. Para a temperatura da água de selo tem-se o gráfico, apresentado na Figura 4, que fornece o fator de correção da taxa de vazão volumétrica para bombas de vácuo. Utilizando como base a temperatura de 30°C de entrada da água utilizada para selo de anel líquido conforme medições realizadas na área e a pressão absoluta de sucção da bomba em 200 mbar (pressão absoluta recomendada no bocal de aspiração dos filtros de discos), pode ser observado um fator de correção aproximado de 0,90. Esta correção é necessária, pois a vazão máxima indicada pelos fabricantes é obtida com uma temperatura de água de serviço a 15 °C a nível do mar.

A vazão de alimentação de água de selagem influencia também no rendimento da bomba de vácuo. O excesso ou a falta de água pode alterar a vazão volumétrica e também causar cavitação gerando danos ao rotor da bomba



**Figura 4.** Curva para correção temperatura da água de selagem. Fonte: <https://asiavacuum pumps.com/download/Article/5.pdf> Manual Sterling SIHI - Sterling Fluids Systems Group. Liquid Ring Vacuum Pumps & Compressors - Technical Details & Fields of Application).

Outro aspecto importante que deve ser analisado nas bombas de vácuo de anel líquido é a influência das folgas entre rotor e carcaça da bomba. Para o melhor rendimento é necessário que as folgas entre o cabeçote e rotor estejam dentro de uma faixa de distância para que o selo de anel líquido seja perfeitamente formado. Esta faixa de folga axial em milímetros é definida pelo fabricante e normalmente é fornecida no manual do equipamento. As folgas acima do valor estabelecido pelo fabricante contribuem para a perda de eficiência da bomba de vácuo. Na Figura 4 tem-se a relação folga versus perda de eficiência.



**Figura 5.** Curva de perda de eficiência em função do aumento de folga. Fonte: Nash (2015)

## 5. Análise e interpretação de dados

Analisando os dados de consumo específico de energia elétrica da filtragem, utilizando como baseline o período de dezembro de 2016 a agosto de 2017, é possível perceber um aumento no consumo de energia elétrica no início do ano, com média de 4,32 KWh/t e aumento de tendência linear deste indicador, Figura 6.

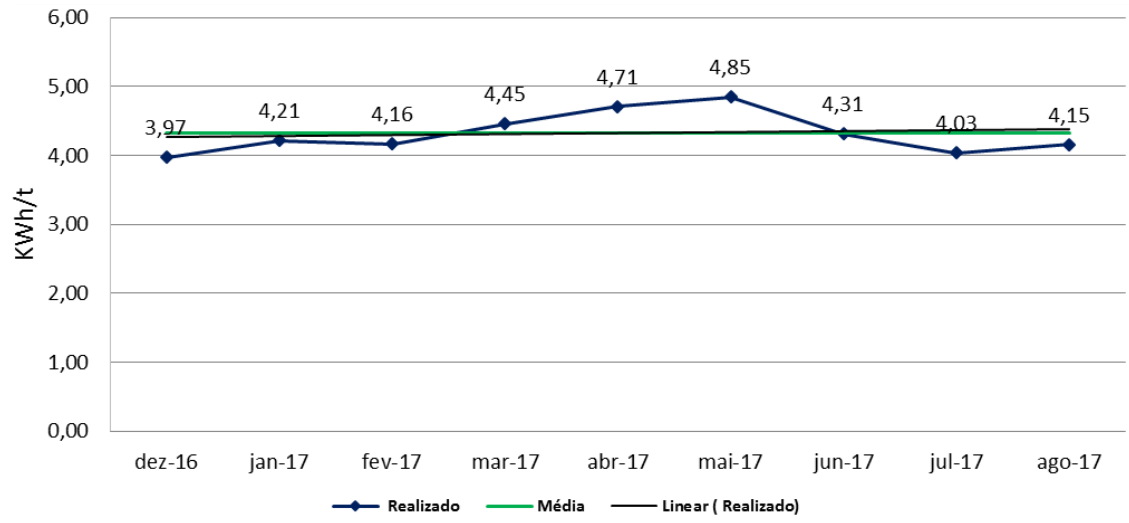


Figura 6. Consumo específico de energia elétrica da filtragem (KWh/t). Fonte: Autor (2018).

Analisando o mesmo período (dezembro de 2016 a agosto de 2017), de acordo com o histograma apresentado na Figura 7, é possível perceber que o vácuo do processo está fora dos limites de especificação.

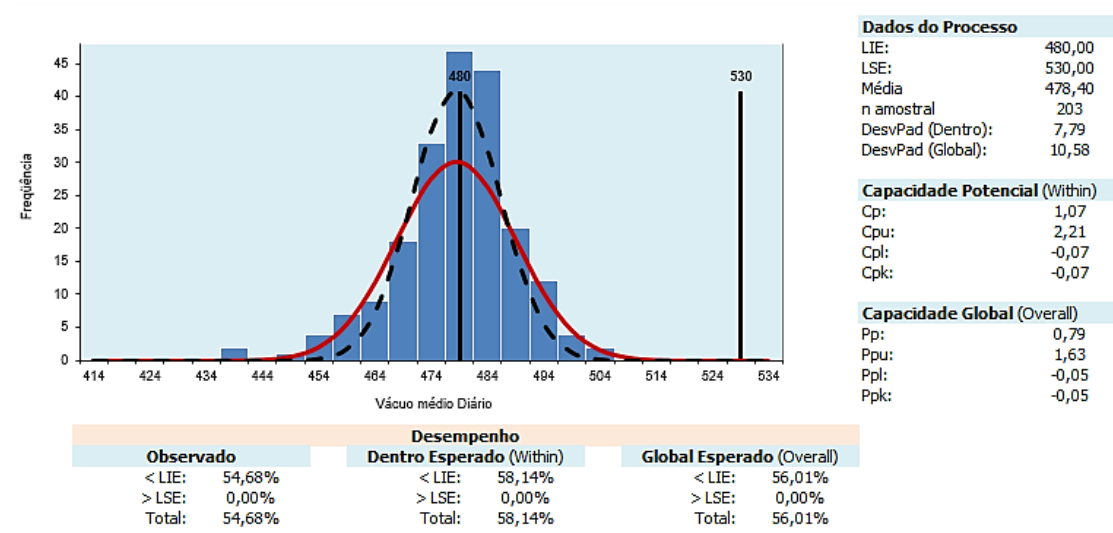


Figura 7. Análise de Desempenho do Vácuo da Filtragem (mmHg). Fonte: Autor (2017).

É também possível observar, no histograma supracitado, características de normalidade, apresentando moda (medidas de tendência central de um conjunto de dados) em torno do limite mínimo de especificação. Observa-se que 54,68% das 203 amostras válidas apresentam valores abaixo do limite mínimo de especificação, ou seja, em 54,68% dos 203 dias analisados o vácuo do sistema estava abaixo do limite mínimo de especificação. Observa que o índice de capacidade (**ppk**) e índice de performance (**cpk**) negativos evidenciam um problema sistêmico. Desta forma percebe-se a ineficiência do sistema de vácuo que gera um aumento no consumo específico de energia elétrica da filtragem.

Para reduzir o consumo específico de energia elétrica do "Processo de Filtragem a Vácuo" foi necessário avaliar todo o processo de operação, compreendendo os procedimentos de parada e partida das bombas de vácuo e sistema de vácuo

como um todo. Desta forma foi possível listar todos problemas que impactava o processo.

A falta de procedimento de operação do "Processo de Filtragem a Vácuo" era um dos principais problemas. Também foram identificados defeitos mecânicos no sistema, como, por exemplo, tubulações com furos (que permitiam entrada de ar falsa prejudicando a pressão de vácuo no sistema) e quantidade de água de selagem da bomba de vácuo fora do padrão de operação (que reduziam a eficiência de aspiração do equipamento).

A soma de todos os problemas resultava no alto consumo específico de energia elétrica, onde se fazia necessário a utilização de todas as bombas de vácuo para se ter uma diferença de pressão adequada para operação da filtragem.

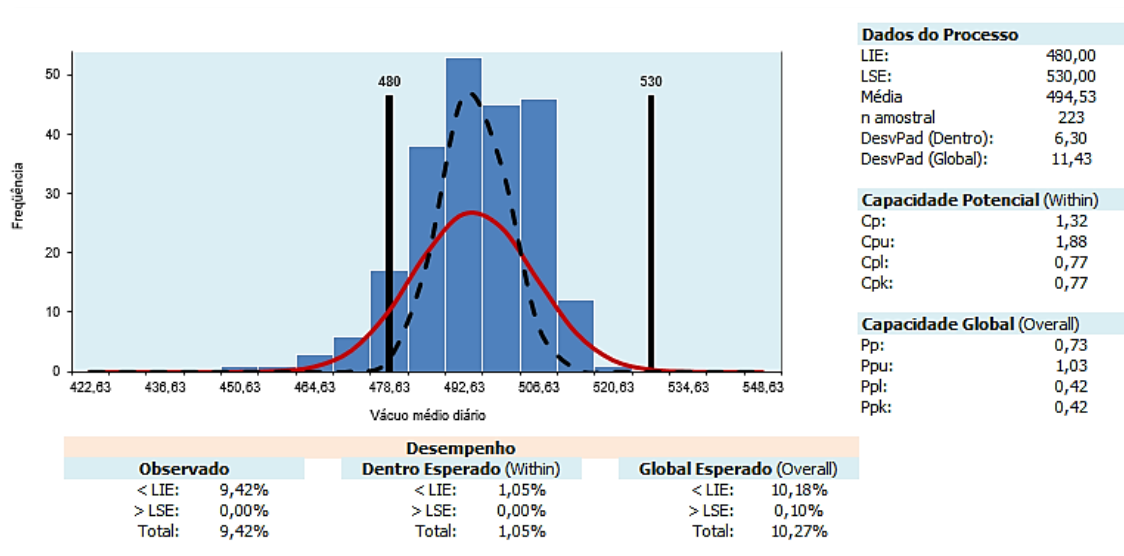
De acordo com SANTOS *et al.* (2007), o consumo específico é calculado pelo consumo de energia elétrica consumida dividida pela produção do processo, Equação 1.

$$CE = \frac{\text{Energia elétrica consumida (KWh)}}{\text{Produção (t)}} \quad (1)$$

## 6. Verificação dos resultados

Após avaliação de todos os problemas, foi criado um procedimento padrão de operação levando em consideração parâmetros de processo definindo quantidade de filtros em funcionamento por bomba de vácuo. Também foi definido as vazões e temperatura de água de selagem, onde a quantidade correta influência diretamente na eficiência da bomba e sanado as entradas de ar falso melhorando a estanqueidade de todo o sistema.

Para verificar a eficácia das ações, foi analisado novamente a pressão de vácuo da filtragem após implantação das ações utilizando o *software* Macrotab da Vale, Figura 8.



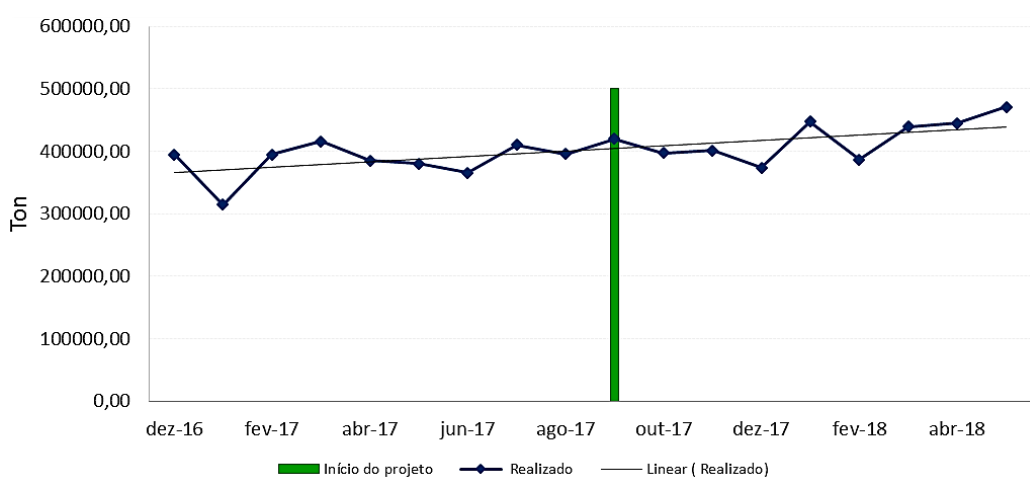
**Figura 8.** Análise de Desempenho do Vácuo da Filtragem (mmHg) após implantação. Fonte: Autor (2018).



Analisando o histograma da Figura 8, percebe-se que o vácuo do processo teve uma melhora considerável, tendo a média de pressão de vácuo deslocado para o lado direito do gráfico aproximando-se do limite superior. Observa-se também uma significativa redução do percentual de amostra abaixo do limite inferior, sendo de apenas 9,42% das 223 amostras válidas. Percebe-se que agora os indicadores **ppk** e **cpk** estão positivos, significando que não há mais problema sistêmicos.

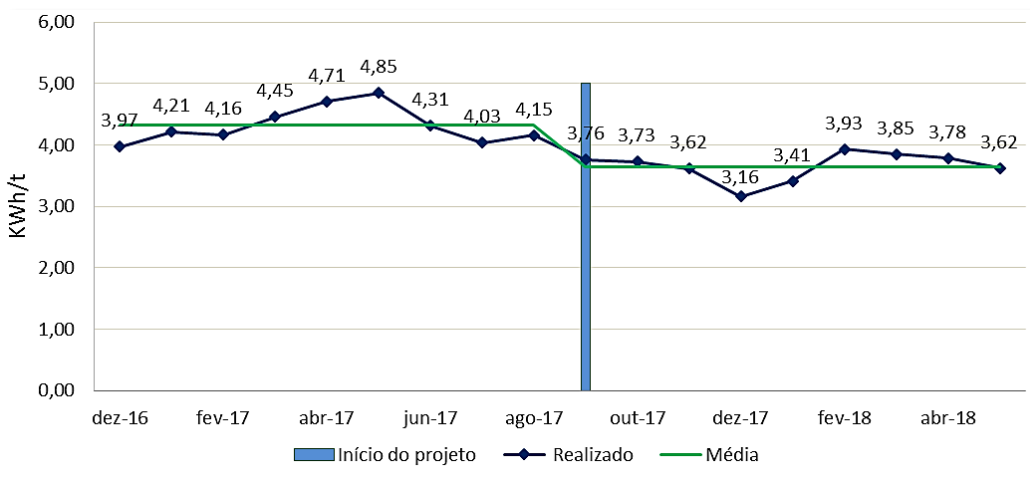
Pelos resultados supracitados conclui-se que as medidas tomadas para melhorar o sistema de vácuo foram eficazes melhorando a eficiência do sistema.

Com o aumento da pressão de vácuo, principal parâmetro para o funcionamento da Filtragem, é possível verificar através da linha de tendência, Figura 9, um aumento de produção após trabalho realizado.



**Figura 9.** Produção da filtragem (t). Fonte: Autor (2018).

Como citado anteriormente, o consumo específico é calculado pela energia consumida dividido pela produção realizada. Na Figura 10 tem-se a redução do consumo específico de energia elétrica após a implantação do trabalho na Filtragem.



**Figura 10.** Consumo específico de energia elétrica (KWh/t) da Filtragem após implantação do trabalho. Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados obtidos com a redução no consumo específico de energia elétrica de um "Processo de Filtragem a Vácuo", calculando o custo evitado, considerando uma média mensal de consumo específico de 4,32 kWh/t e o custo unitário mensal da energia elétrica de R\$0,20, obtém-se o "Custo Total Evitado", conforme mostrado na Tabela 1, de R\$ 504.213,34 em nove meses de operação.

**Tabela 1.** Demonstrativo do custo evitado. Fonte: Autor (2018).

Mês	Custo Unitário Mensal (R\$)	Consumo Médio Realizado (kWh/t)	Economia (Ref.: 4,32 kWh/t)	Produção Filtragem (t)	Custo Evitado (R\$)
Sep-17	R\$ 0.20	3.76	0.56	420,058	R\$47,110.93
Oct-17	R\$ 0.20	3.73	0.59	397,258	R\$46,955.99
Nov-17	R\$ 0.20	3.62	0.70	401,027	R\$56,517.83
Dec-17	R\$ 0.20	3.16	1.16	373,624	R\$86,815.20
Jan-18	R\$ 0.20	3.41	0.91	447,384	R\$81,554.22
Feb-18	R\$ 0.20	3.93	0.39	386,468	R\$30,280.33
Mar-18	R\$ 0.20	3.85	0.47	439,230	R\$41,126.88
Apr-18	R\$ 0.20	3.78	0.54	445,100	R\$48,034.04
May-18	R\$ 0.20	3.62	0.70	470,965	R\$65,817.90
<b>CUSTO TOTAL EVITADO</b>					<b>R\$ 504.213,34</b>

## 7. Considerações Finais

Analisado todos os problemas que impactam no alto consumo específico de energia de um "Processo de Filtragem a Vácuo", percebe-se que nem sempre existe procedimento de operação bem definido. Isso deve-se ao fato de que sempre é necessário realizar uma decisão em operar ou não uma bomba de vácuo, onde o consumo de energia é altíssimo. Nesse sentido, a decisão sempre é consumir mais, colocando em operação todas as bombas disponíveis no processo produtivo.

Através deste trabalho pode-se concluir que é possível produzir mais com menos, desde que se tenha um procedimento bem definido.

É preciso também que o parque de ativos, todos os equipamentos do processo possuam confiabilidade para operar em condições normais tendo assim um vácuo ideal para a separação do sólido/líquido da filtragem a vácuo reduzindo o consumo específico de energia elétrica do processo evitando custos desnecessários.

## 8. REFERÊNCIAS

CHAMBERS, A., FITCH, R.K. and HALLIDAY, B.S. 1998. **Basic Vacuum Technology**, 2.ed. Institute of Physics Publishing. Bristol and Philadelphia. IOP Publishing Ltd.

FÁBRICA. **Manual de operação da usina de fábrica**. Rev. 1. Congonhas, MG, 2013. p. 77-88.

GAMA, S. 2002, **Introdução à Ciência e Tecnologia do Vácuo** (Apostila da disciplina de tecnologia do vácuo, Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas). Disponível em: < <http://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/files/2014/09/F-640-apostila.pdf> >. Acesso em: 30 mai. 2016.

NASH. Manual de instruções Bomba de Vácuo. 1. ed. Alemanha, 2006.

O'HANLON, J.F. 2003. **A User's Guide to Vacuum Technology**, 3 ed, Ed. Wiley-Interscience. A John Wiley & Sons, Inc. Publication.

PAIVA, J. A. 2010. **Aplicação da Tecnologia do Vácuo em Projeto de Engenharia de Precisão**", ED. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 11 p.

RYANS, J. L. & ROPER, D. L. 1986. **Process Vacuum System Design and Operation**, ED. MacGraw-Hill, United States, 354 p.

SANTOS A. H. M. *et al.* **Conservação de Energia**. 3. ed. Itajubá: FUPAI, 2006. IMBIL. **Manual de instalação, operação e manutenção IMBIL**. 1. ed. Itapira, SP, 2008.

SAUNDERS, S. & BROWN, H. R., 2002, **The Philosophy of Vacuum**, ED. Oxford University Press, New York, 291 p.

STEMPNIAK, R. A. 2002. **A ciência e a tecnologia do vácuo**. (Sociedade Brasileira de Vácuo). Disponível em:< <http://www.sbvacu.org.br/noticias/o-que-e-vacu.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.