

EFICIÊNCIA E CONSUMO DE UTILIDADES EM SISTEMAS DE VÁCUO - UMA ABORDAGEM SOBRE A APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS EM PLANTAS DE PAPEL E CELULOSE

Frederico Marques¹, Joerg Zuercher², Rafael Mendes³

¹ Gerente de Vendas e Contratos – MAN Diesel & Turbo do Brasil

² Gerente de Projetos Sênior – Sistemas de Vácuo – MAN Diesel & Turbo (Suíça)

³ Engenheiro de Aplicações – MAN Diesel & Turbo do Brasil

RESUMO

Indicadores de sustentabilidade estão cada vez mais presentes na produção de papel e celulose. Somando-se a uma maior expectativa pelo mercado consumidor de responsabilidade ambiental do fabricante, fazem-se também presentes elementos econômicos os quais se relacionam a diversos parâmetros de inovação do processo fabril.

Em face à presente crise hídrica e aumento dos custos energéticos, o consumo de utilidades tende também a ter sua participação acentuada na estrutura de custo direto da produção. Nesse cenário, medidas para incremento de eficiência energética buscam cada vez mais a aplicação de novas tecnologias que permitam uma maior competitividade e disponibilidade, reduzindo os custos de produção.

Para as plantas de papel e celulose, essa abordagem competitiva encontra-se amplamente amadurecida nos mercados europeus, e mostra-se como tendência no mercado nacional. Para o sistema de vácuo, tais tecnologias já bem estabelecidas internacionalmente encaixam-se de forma extremamente pertinente à atual conjuntura do país.

As vantagens operacionais para o sistema de vácuo por meio de sopradores centrífugos serão apresentadas de maneira detalhada para as plantas de papel e de celulose. Após serem apresentados os princípios funcionais e vantagens técnicas desta tecnologia, sua aplicação será justificada por meio de análises técnicas e econômicas para aplicação.

Os benefícios chegam a justificar, inclusive, a implementação para modernização em plantas já existentes. Sendo esta uma tendência dos países centrais de vanguarda tecnológica, apresentaremos também aspectos relativos a modernização de uma fábrica já existente com esta tecnologia.

Palavras-chave: eficiência energética, redução de consumo de água, sistemas de vácuo

1. INTRODUÇÃO

Eficiência energética figura entre os principais elementos na indústria de papel e celulose no mercado nacional atual. A elevação dos preços de energia, além de ter impactado fortemente nos fabricantes - tanto nos que vendem, como aqueles que compram energia – aumentou severamente a urgência para adoção de tecnologias e sistemas mais eficientes com a finalidade de se buscar a obtenção de melhores resultados operacionais.

Adicionalmente, devido à crise hídrica, houve aumento na consciência ambiental e preocupação pela redução do consumo de água inclusive no ambiente industrial. Dessa forma, há tendência de as restrições ambientais se elevarem ainda mais no setor, assim como elevação de custos para esse insumo.

Nesse cenário, o tradicional sistema de vácuo utilizando bombas de selo líquido nas plantas de papel e celulose figura como um dos grandes vilões no consumo de energia e utilidades no processo produtivo.

De forma a apresentar possibilidades de incremento de eficiência no processo, será discutido nesse estudo, de maneira detalhada, a concepção tecnológica de sopradores centrífugos de vácuo em contrapartida ao modelo tradicional de bombas de selo líquido, já em desuso nos mercados mais competitivos.

Em sequência ao seu entendimento, poderão ser realizadas análises comparativas da aplicação da tecnologia em plantas de papel e celulose. Além disso, será discutida a implementação da tecnologia, sob a ótica de uma revitalização de planta verificando-se breve retorno de investimento, ainda que em comparação com um investimento tido como nulo para a não modificação da planta.

2. CONCEPÇÃO TECNOLÓGICA

De forma a estabelecer uma base comparativa entre ambos os sistemas, serão apresentados em detalhes o princípio operacional da máquina assim como seus principais componentes e subsistemas.

Partindo-se desse entendimento, poderão ser discutidos de maneira mais aprofundada os ganhos operacionais e energéticos para o sistema.

2.1 Concepção construtiva e de sistemas

Bombas de Selo Líquido:

O arranjo de sistemas de vácuo utilizando bombas de selo líquido é caracterizado pelos principais componentes: bombas de selo líquido, motores e sistemas elétricos, silenciadores, separadores de entrada e bombas de extração, separadores de descarga e circuito de água de selagem.

O circuito de água de selagem pode ser de duas principais maneiras: em circuito aberto, no qual a água segue no processo sendo reutilizada em etapas subsequentes; ou em circuito completamente fechado, no qual a água é tratada e resfriada por meio de torres de resfriamento retornando às bombas.

A seguir é apresentada de maneira ilustrativa uma instalação com um sistema de bombas de selo líquido para vácuo;



Figura 1: Instalação utilizando bombas de selo líquido para geração de vácuo.

Uma das características da adoção das bombas de selo líquido refere-se ao grande requerimento de espaço para instalação dos equipamentos. Além de as tubulações e sistemas de água acarretarem uma grande demanda de espaço e material, a relativa baixa capacidade volumétrica das bombas, quando comparada aos sopradores de vácuo, demanda a aplicação de diversos equipamentos muitas vezes em paralelo.

Sopradores Centrífugos de Vácuo

Uma das grandes vantagens operacionais e de instalação dos sopradores centrífugos de vácuo concerne à ausência de água de selagem. Dessa forma, além da drástica redução do consumo de utilidades especialmente em plantas de papel, é notável a redução de componentes relativos ao sistema de água selagem (demandado pelas bombas de selo líquido), assim como, conseqüentemente, para o tratamento de efluentes.

A vantagem relativa à capacidade volumétrica deve-se especialmente ao fato de os sopradores de vácuo centrífugos serem isentos de água no processo de compressão, de forma que podem operar em rotações mais elevadas de maneira a admitirem valores superiores de vazão.

Esse aumento de rotação, todavia, não ocasiona diminuição da vida útil do equipamento, uma vez que diferentemente das bombas, não são utilizados mancais de rolamento. Com concepção construtiva semelhante às turbomáquinas de maior porte (tais quais turbinas, compressores e expansores) são utilizados mancais de deslizamento oleodinâmico, que não apresentam desgaste e não sofrem influência da rotação.

Essa característica, além de conferir maior vida útil ao equipamento, tende a reduzir notavelmente os requisitos de manutenção e a aumentar a confiabilidade do sistema. A concepção construtiva de um soprador centrífugo de vácuo de múltiplos estágios é apresentada a seguir:

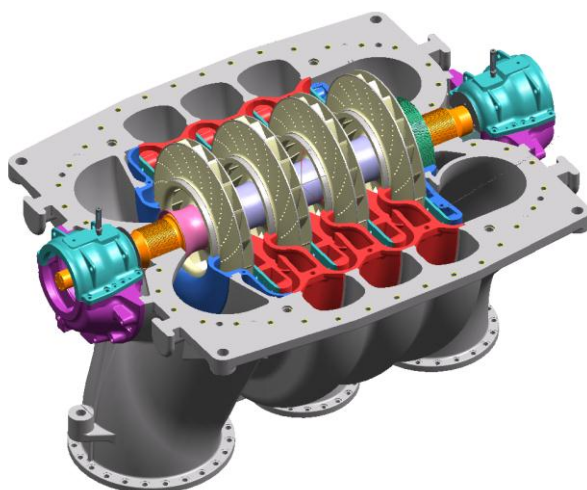


Figura 2: Principais componentes e design construtivo de um soprador centrífugo de múltiplos estágios.

Os sopradores centrífugos de vácuo, caracterizam-se como turbomáquinas de princípio operacional dinâmico. Dessa forma, a energia cinética conferida ao gás pelo movimento rotativo do impelidor, acarreta o seu aumento de pressão. Para o caso das máquinas que geram vácuo, uma vez que a descarga encontra-se à pressão atmosférica, tem-se a sucção a níveis inferiores ao atmosférico.

Devido ao fato de a elevação de pressão se dever a fenômenos essencialmente dinâmicos, e à ocorrência de valores de rotação mais elevados, há uma capacidade volumétrica significativamente superior. Dessa forma, ainda que com dimensões semelhantes a uma ou duas bombas, pode-se obter valores de vazão superiores a dez equipamentos em paralelo.

De forma a melhor ilustrar a capacidade volumétrica, é apresentado de maneira exemplar um diagrama de seleção de sopradores centrífugos especificando os envelopes de vazão para diversos modelos, assim como seus respectivos limites para níveis de vácuo.

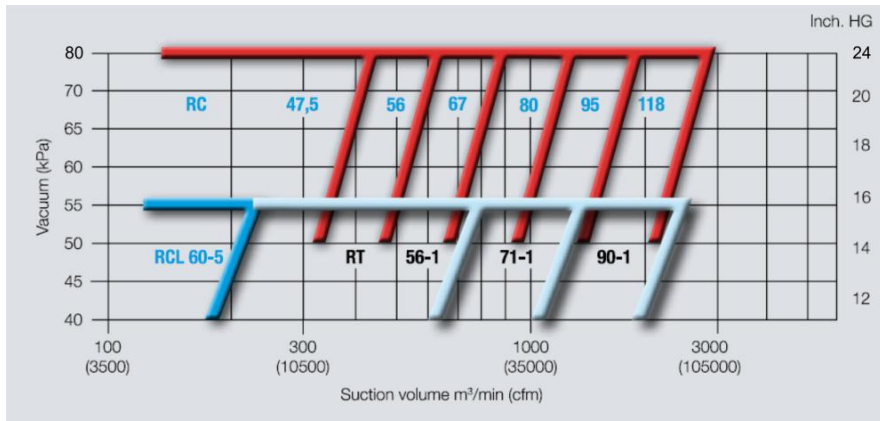


Figura 3: Limites operacionais e capacidades volumétricas de sopradores centrífugos.

A seguir também é apresentada uma instalação contendo sopradores de vácuo de simples e de múltiplo estágio, assim como um comparativo para *footprint* de ambos os sistemas de vácuo:



Figura 4: Instalação utilizando dois sopradores centrífugos de simples e múltiplos estágios.

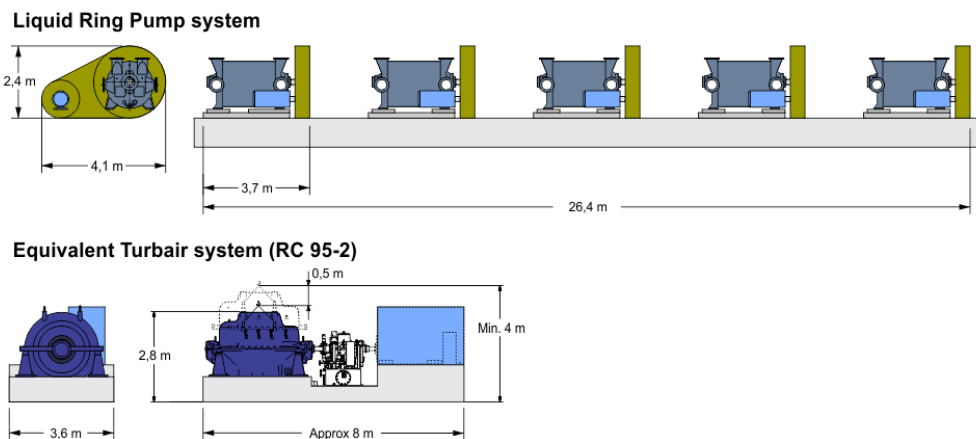


Figura 5: Comparativo de *footprint* para sistemas de vácuo de mesma capacidade.

Como referido anteriormente, há também menos requisitos de instalação e de subsistemas para o sistema de vácuo por meio de sopradores centrífugos. Dentre essas características, pode-se citar: ausência de sistema de água de selagem e respectivas válvulas de controle, ausência de torre de resfriamento, redução das válvulas de “ar falso” e ausência de separador de descarga.

Por essa razão, apesar da presença de equipamentos mais sofisticados (sopradores centrífugos de vácuo), o investimento global para ambos os sistemas são equivalentes.

A seguir é apresentado um diagrama esquemático de uma instalação com sistema de vácuo por meio de sopradores centrífugos:

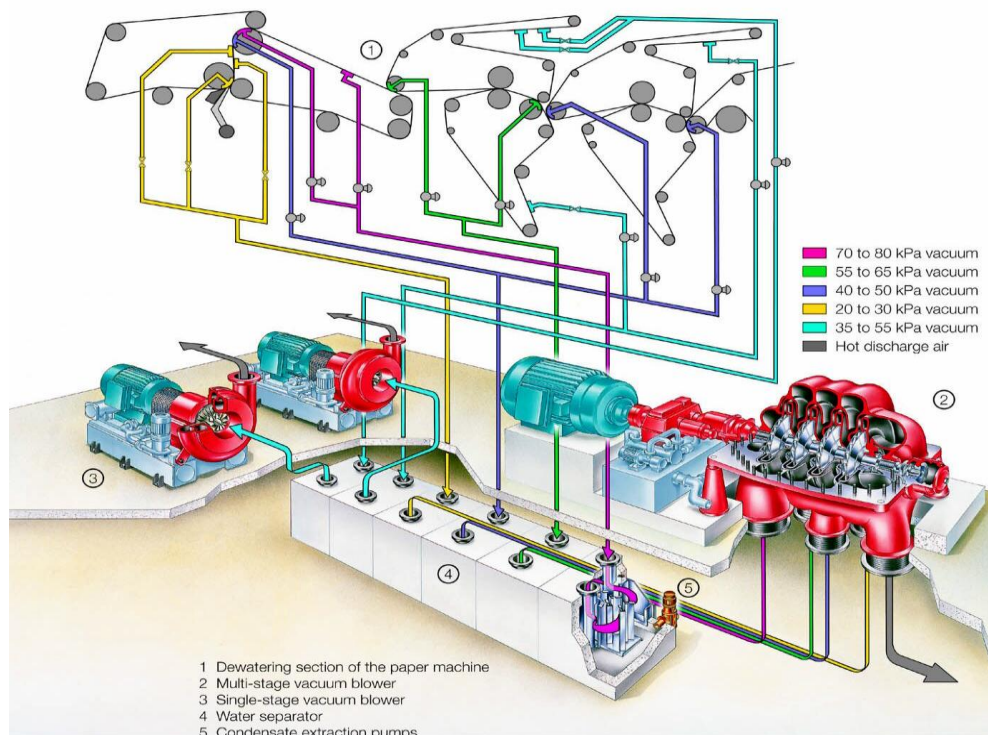


Figura 6: Diagrama esquemático de instalação com sopradores centrífugos.

Outra característica positiva à ausência da água de selagem na geração de vácuo, refere-se à não necessidade de grandes separadores na descarga da máquina. Uma vez que a compressão se dá sem presença de água em estado líquido, obtêm-se temperaturas de saída significativamente mais elevadas (em valores na ordem de 160°C) de modo que toda água encontra-se em estado de vapor.

Essa característica, além das vantagens operacionais, tende a reduzir de maneira significativa a ocorrência de corrosão nas partes internas do equipamento, sendo esse mais um fator de aumento de sua vida útil.

As elevadas temperaturas de descarga, também possibilitam eficaz recuperação térmica em valores superiores a 80% da energia elétrica dispendida, possibilitando-se a redução de maneira ainda mais acentuada do consumo energético no processo produtivo. Dentre as possibilidades de recuperação da energia térmica liberada pelo sistema, tem-se diversas possibilidades dentre as quais pode-se citar o pré-aquecimento de ar de insuflamento, aquecimento de água, aquecimento para desumidificação de teto ou soluções conjuntas.

A seguir são apresentadas de maneira esquemática algumas dessas opções de recuperação energética. Vale ressaltar que a seleção da melhor etapa a se aplicar a recuperação energética do ar de saída do soprador de vácuo depende de cada processo, devendo ser feitos para suas específicas demandas.

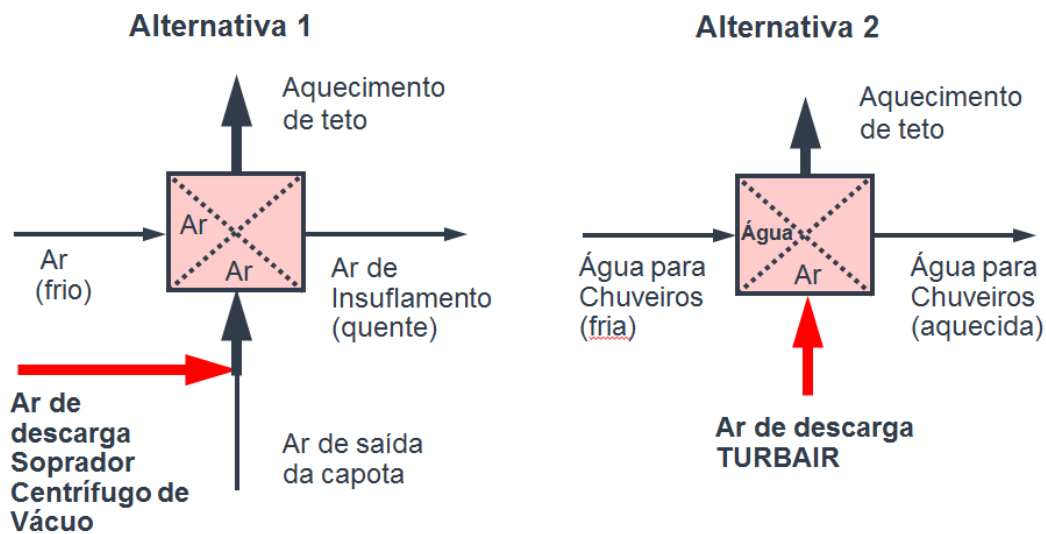


Figura 7: Exemplos de opções de recuperação de energia térmica na descarga de sopradores centrífugos.

Os ganhos econômicos dessa aplicação poderão ser discutidos oportunamente na seção de avaliação econômica, conjuntamente aos ganhos de eficiência.

2.2 Eficiência energética

Como exposto anteriormente, o reaproveitamento dos gases de descarga dos sopradores centrífugos de vácuo como fonte adicional de calor para o processo mostra-se como uma forma de eficaz recuperação energética. A possibilidade de recuperação térmica para esses gases supera, em geral, os 80% da energia elétrica dispendida para todo o sistema de vácuo.

Além disso, devido ao conceito construtivo da máquina, obtém-se valores de eficiência significativamente superiores que os obtidos para bombas de selo líquido. Dessa forma, em carga nominal, há uma redução de consumo elétrico no sistema de vácuo em geral na ordem de 30%.

Adicionalmente à maior eficiência, há possibilidades de maiores reduções no consumo durante a operação. Isso se deve especialmente ao comportamento da máquina em cargas parciais. Por se tratar de uma máquina de princípio operacional dinâmico, há maior flexibilidade de limites de vazões (ainda que em rotação constante) do que as bombas de selo líquido.

As bombas por serem máquinas de princípio volumétrico, demandam a compressão de certo volume delimitado por suas câmaras de compressão e múltiplo de seu valor de rotação. Dessa forma, para as bombas, em caso de menor demanda de ar pelo sistema de vácuo durante a operação ou mudança de parâmetros de operacionais, deve-se adicionar ar ao sistema suprindo-se a demanda volumétrica através do equipamento, que deverá ser constante. Por essa razão, as variações de energia consumida são marginais para operação à rotação constante do equipamento.

A seguir são apresentadas as curvas de vácuo de um soprador centrífugo de quatro estágios, assim como sua respectiva redução de consumo energético em cargas parciais (em vermelho):

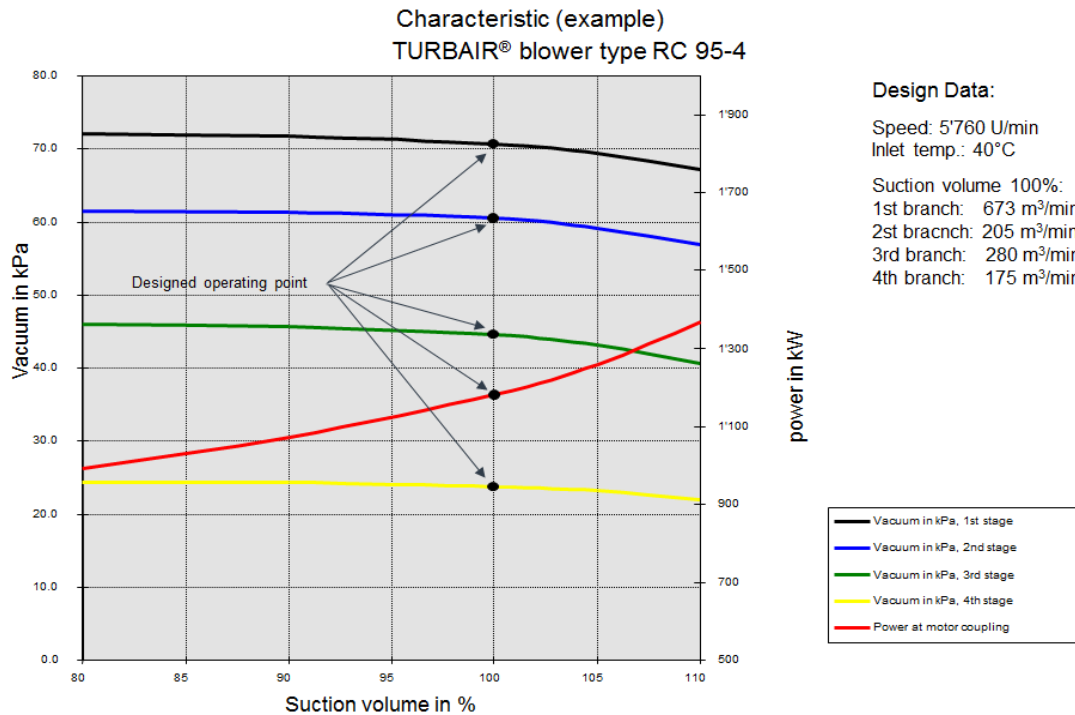


Figura 8: Níveis de vácuo e potência em carga parcial operando a rotação constante (soprador centrífugo de múltiplos estágios).

Além da significativa redução em carga parcial, pode-se notar na tabela descritiva de condições operacionais à direita, elevados valores de vazão em cada seção de um soprador centrífugo de múltiplos estágios.

3. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS

Baseado no entendimento das especificidades de cada conceito tecnológico de sistemas de vácuo, serão discutidos em estudos de caso exemplares a aplicação de sopradores centrífugos de vácuo.

3.1 Plantas de Celulose

O Brasil, além de possuir uma ampla quantidade de fábricas produtoras de celulose com forte presença no cenário global, vem apresentando nos últimos anos, diversos investimentos em novas plantas de grande porte e modernizações.

Essas plantas, além de autossuficientes energeticamente e de venderem seu excedente energético à rede, possuem amplo sistema de vácuo. Dessa forma, o menor consumo elétrico em relação às bombas vácuo, assim como a economia de vapor devido à recuperação energética, resultam em maior excedente de energia para venda no mercado.

A seguir são apresentados os principais parâmetros para aplicação de sopradores centrífugos de vácuo para uma planta de celulose em comparação à concepção de bombas de selo líquido:

Tabela 1. Comparativo equipamentos geradores de vácuo planta de celulose.

	Máquinas (unidades)	Potência total Consumida (kW)	Recuperação Energética* (kw)	Consumo de água (l/min)
Bombas de Selo Líquido	4	1550	Não	~ 1000
Soprador Centrífugo	1	990 - 1240	850 - 1064	0

* Para o ar de descarga.

Na tabela inicial, nota-se para o sistema de sopradores centrífugos de vácuo um consumo energético 310 kW inferior ao apresentado pela concepção de bombas de selo líquido. Esse redução de consumo elétrico pode vir a alcançar 560 kW em carga mínima de operação (queda de 37% no consumo). Adicionalmente, há possibilidade de recuperação energética de 1064 kW em carga máxima, elevando-se ainda mais os ganhos energéticos nessa condição operacional para possíveis 1374 kW em relação ao consumo das bombas de selo líquido.

No cenário econômico e energético atual, especialmente para as plantas que vendem energia, essa economia energética deve vir a superar facilmente os dois milhões de reais por ano.

Além do exposto, os investimentos para ambas as tecnologias são tidos como equivalentes, uma vez que apesar de as bombas por si só apresentarem preço inferior ao soprador, há significativamente mais auxiliares (e.g. sistema de água, sistemas elétricos, fundações) do que a solução de sopradores centrífugos.

Vale também ressaltar que para as plantas mais recentes de celulose os ganhos relativos à redução de consumo de água são mais limitados, uma vez que a água de selagem é muitas vezes reaproveitada no processo.

3.2 Plantas de Papel

Diferentemente das plantas de celulose, a redução de consumo de água tem impacto direto na melhora do processo de uma planta de papel. Isso se deve ao fato de a água de selagem não ser utilizada no processo, de forma que sua ausência impacta diretamente no consumo da planta.

Tomando-se por base o caso das plantas de papel *tissue*, é de conhecimento que as fábricas europeias (que adotam o sistema de sopradores centrífugos de vácuo) possuem um consumo específico de água da ordem de 7 m³/ton ao passo que as plantas brasileiras, ainda adotando o sistema de bombas de selo líquido, chegam a alcançar um consumo específico de 14 m³/ton.

Há ainda outra questão estratégica para as plantas de papel em geral. Os custos de energia compõem grande parcela dos custos de produção, podendo em alguns casos superar os 50% dos custos totais da planta. Além disso, os demais custos de produção, encontram-se em geral, na mesma base de mercado da concorrência (matéria-prima, insumos químicos e mão-de-obra). Dessa forma, o aumento de eficiência energética e sua consequente redução de custos energéticos, figuram como fator crucial para se aumentar a competitividade do produto frente à concorrência.

A seguir são apresentados os valores para aplicação da tecnologia de sopradores centrífugos de vácuo em comparação à bombas de selo líquido para uma planta *tissue* de 30.000 ton/ano:

Tabela 2. Comparativo equipamentos geradores de vácuo – planta de papel *tissue*.

	Máquinas (unidades)	Potência total Consumida (kW)	Recuperação Energética (kW)	Consumo de água total (l/min)
Bombas de Anel Líquido	2	500	Não	~800
Soprador Centrífugo	1	250 - 390	176 - 275	0

Ainda que para um sistema de baixa capacidade, observa-se significativo ganho energético: redução de 110 kW em carga nominal (podendo-se alcançar 250 kW em carga mínima de operação). Adicionalmente, há possibilidade de recuperação térmica entre 176 kW e 275 kW para o ar de exaustão.

Os dados podem ser melhor ilustrados através do gráfico apresentado para gastos energéticos com o sistema de vácuo dessa planta. Considerou-se para tal um custo de energia de 297,20 BRL/MWh. Considerou-se também uma inflação para custos de energia de 2% ao ano.

Além disso, para fins de análise da recuperação energética, considerou-se a utilização do ar de descarga do soprador centrífugo para pré-aquecimento do ar de insuflamento. O pré-aquecimento, tem por consequência a direta redução de consumo energético em uma caldeira a gás. O preço do gás foi considerado em 2,08 BRL/kg, correspondendo a um custo para energia térmica de 194,47 BRL/MWh.

Os ganhos econômicos para um horizonte de trinta anos, considerando-se uma inflação anua de 2%, são apresentados a seguir:

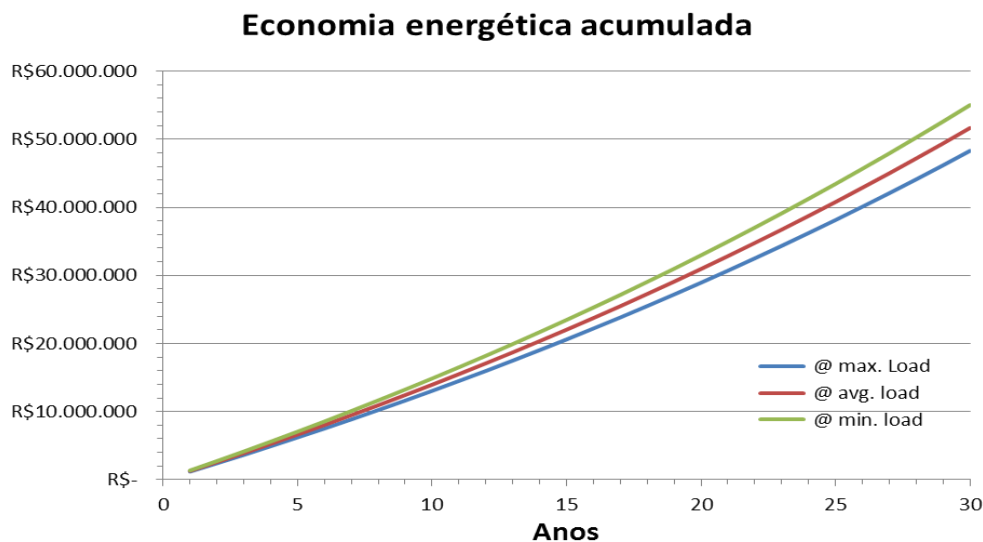


Figura 9: Economia energética acumulada para aplicação de sopradores centrífugos de vácuo em uma planta de papel *tissue* de 30.000 ton/ano.

Tabela 3. Economia energética no primeiro ano de operação para sistema de vácuo por sopradores centrífugos em relação às aplicação por bombas de selo líquido.

	Carga Máxima (390 kW)	Carga Média (320 kW)	Carga Mínima (250 kW)
Energia elétrica	R\$ 606.609	R\$ 788.852	R\$ 971.095
Energia Térmica	R\$ 554.097	R\$ 454.643	R\$ 355.190
Valores Acumulados	R\$ 1.160.706	R\$ 1.243.496	R\$ 1.326.285

3.3 Revitalizações e Substituição de Sistemas

A modernização de sistemas de vácuo para sopradores centrífugos é realizada sem provocar grandes paradas na fábrica. Primeiramente, por ser um sistema distinto ao das bombas de selo líquido, é em geral posto em paralelo de forma que seus componentes podem ser instalados enquanto a planta é mantida em operação, restando-se apenas realizar a interligação durante uma parada planejada de fábrica. Além disso, há possibilidade de se manter a redundância caso haja interesse do produtor.

De forma a se avaliar a viabilidade de implementação do sistema de vácuo por meio de sopradores centrífugos em substituição às bombas de selo líquido, é apresentado um estudo de caso realizado em base internacional para uma planta de 250.000 ton/ano com circuito fechado de água de selagem.

Consumo elétrico:

Bombas de selo líquido: seis bombas, consumo total de 1080 kW
 Sopradores centrífugos: um soprador, consumo de 780 kW (redução de 29%)
 Economia anual: 250.000 USD (custo energético: 100 USD/MWh)

Consumo de água de selagem:

Bombas de selo líquido: seis bombas, consumo total de 1500 l/min
 Sopradores centrífugos: um soprador, sem consumo de água de selagem
 Economia anual: 77.000 USD (custo de 0,1 USD/m³)

Recuperação energética:

Bombas de selo líquido: não viável (temperatura de descarga de aprox. 70°C)
 Sopradores centrífugos: recuperação de 600 kW em energia térmica (80% de recuperação)
 Economia anual: 190.000 USD (custo de 35 USD/MWh);

Redução anual de consumo da planta: 517.000 USDInvestimento para revitalização do sistema:

A seguir serão apresentados valores orientativos e conservadores para os custos atrelados à modernização do sistema de vácuo para a mesma planta referenciada anteriormente. Na sequência também é mostrado o pay-back para o investimento:

Soprador centrífugo de vácuo:	1.000.000 USD
Fundação:	40.000 USD
Separador de água de entrada:	20.000 USD
Motor elétrico:	100.000 USD
Trocador de calor:	25.000 USD
Silenciador de descarga:	25.000 USD
Controles e tubulações:	30.000 USD

Custo total:	1.240.000 USD
Economia anual:	517.000 USD
Pay-back	2,4 anos

4. CONCLUSÕES

O estudo pode discutir sob ambas as óticas, técnica e econômica a aplicação de sopradores de vácuo centrífugos em plantas de papel e celulose. Dessa forma, buscou-se dividir com os profissionais brasileiros as principais razões pela ampla aceitação e predominância dessa tecnologia nas plantas mais modernas no mundo, apresentando dessa forma a tecnologia.

O entendimento da tecnologia e sistemas aplicados é essencial para que essa venha a ser aplicada nos próximos projetos no país. Por meio das discussões realizadas, acredita-se que possa ter sido possível esclarecer as principais razões que motivam sua aplicação assim como discorrer mais à fundo acerca de suas vantagens competitivas, que tornam a aplicação viável inclusive a *revamps* em plantas já existentes.

Acredita-se que o principal entrave em sua aplicação no mercado nacional ainda se refira ao desconhecimento por parte de muitos engenheiros e projetistas no setor, assim como de investidores. A tecnologia encontra-se bem estabelecida e é unanimidade de aplicação em diversos mercados devido à sua comprovada superioridade energética.