

# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA PLANTA INDUSTRIAL DE LOUÇAS SANITÁRIAS: ESTUDO DE CASO

BRUNA L. L. CRISOSTOMO

*Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande  
Caixa Postal 10105, 58428-740 Campina Grande, PB, BRASIL  
E-mails: bruna.crisostomo@ee.ufcg.edu.br*

BENEDITO A. LUCIANO

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande  
Caixa Postal 10105, 58428-740 Campina Grande, PB, BRASIL  
E-mails: benedito@dee.ufcg.edu.br*

**Abstract**—This paper presents an energy efficiency study focused in electricity consumptions developed in a sanitary ware factory placed in João Pessoa, Paraíba. Firstly, an energy audit was made to define the electrical consumption profile and to identify the sectors with more electrical energy efficiency opportunities. As a result, improvements were studied and proposed to reduce energy loss and eliminate energy waste. An action plan with the electrical efficiency solutions is presented as part of a huge costs reduction project.

**Keywords**—Energy Efficiency, Energy Audit, Costs Reduction, Optimization.

**Resumo**—Neste trabalho é apresentado um estudo sobre eficiência energética, com foco no consumo de energia elétrica, desenvolvido em uma fábrica de louças sanitárias, localizada na cidade de João Pessoa, Paraíba. O trabalho iniciou-se com uma auditoria energética, com a análise do perfil de consumo da planta, bem como na identificação dos setores com maiores oportunidades de efficientização. Em seguida, realizou-se o estudo e a proposição de melhorias nos setores, processos e equipamentos, a fim de se reduzir perdas e eliminar desperdícios de energia elétrica. O plano de ação para a execução das ações propostas é apresentado como parte de um projeto redução de custos.

**Palavras-chave**— Auditoria Energética, Eficiência Energética, Redução de Custos, Otimização, Efficientização.

## 1 Introdução

Com a crise hídrica do Brasil que se iniciou 2014, as usinas térmicas foram acionadas com maior frequência para suprir a demanda por energia elétrica, o que encareceu a sua geração. Buscando regular as despesas variáveis deste processo e aumentar a arrecadação, as Bandeiras Tarifárias foram criadas para que os custos reais fossem sinalizados para os consumidores.

O setor industrial, o maior comprador de energia elétrica do Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional 2017 – BEN 2017, vem sofrendo impacto do encarecimento de um dos seus principais insumos, (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2017). Além dos incentivos recebidos, para se tornarem mais competitivas, as indústrias começaram a investir em eficiência energética e em gerenciamento de consumo de energia, na tentativa de baratear os seus gastos e ganharem competitividade no mercado.

De maneira geral, os processos de efficientização energética são constituídos de redução de perdas e eliminação de desperdícios.

A eficiência energética pode ser entendida, também, como a relação direta entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado, estando, neste conceito, a eficiência associada à quantidade de energia efetivamente utilizada, e não à quantidade mínima teoricamente necessária para

realizar um serviço, (EPE, 2010). Este conceito aplica-se tanto a serviços, cujo conteúdo energético nem sempre é claramente definido, quanto à manufatura, em que o conteúdo energético do bem físico pode ser delimitado.

Assim, o processo de efficientização energética envolve conhecimentos dos campos da engenharia, da economia e da administração.

Neste contexto, faz-se necessária a realização de uma auditoria energética, a fim de se determinar como e onde a energia está sendo consumida e fundamentar o programa de efficientização de energia (Viana *et al.*, 2012).

Viana *et al.* (2012, p.56) definem auditoria energética como sendo “a análise sistemática dos fluxos de energia em um sistema particular, visando discriminar as perdas e orientar um programa de racionalização de insumos energéticos”. Os autores citados listam ainda termos que são empregados com o mesmo significado: análise energética, diagnóstico energético.

De acordo com Thumann (2007), em termos práticos, auditoria energética pode ser definida simplesmente como um processo de estudo do sistema de energia, a fim de se identificar onde o prédio ou a planta usa energia e verificar oportunidades de otimização do uso dos recursos energéticos.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2015), a primeira etapa dessa auditoria consiste na análise do consumo energético atual da unidade em

que se deseja implantar um projeto de eficiência energética, devendo-se fazer um levantamento das faturas de energia consumidas no intervalo de pelo menos um ano, período suficientemente necessário para detectar variações de consumo decorrentes de fatores externos, internos e sazonalidades como variações do processo. Tais dados devem ser organizados em tabelas, de forma que fique mais simples a extração das informações necessárias, como a demanda, o consumo e o número de dias contabilizados nas faturas, (Thumann, 2007).

Após definido o padrão de consumo, o segundo passo trata-se de uma visita técnica à unidade, além da checagem dos equipamentos, a fim de se verificar os sistemas que possuem altas demandas de energia. Os dados são então processados para a elaboração do relatório que constitui a etapa final do projeto, na qual são identificadas as oportunidades de implantação de melhorias de otimização do uso dos recursos energéticos, apontando seus custos e seus ganhos esperados. Ou seja, a viabilidade técnica e econômica.

## 2 Perfil de Consumo de Energia Elétrica

Tomando como base a planta industrial sob estudo, foi realizado o levantamento das faturas energéticas no período de quinze meses, de outubro de 2016 a dezembro de 2017, e os dados obtidos foram organizados em forma de gráficos, conforme mostrados na Figura 1.

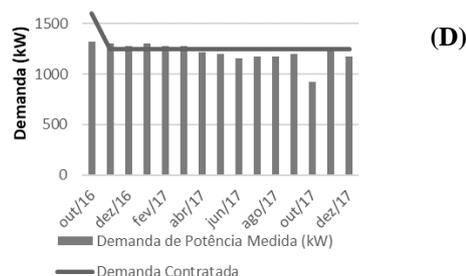
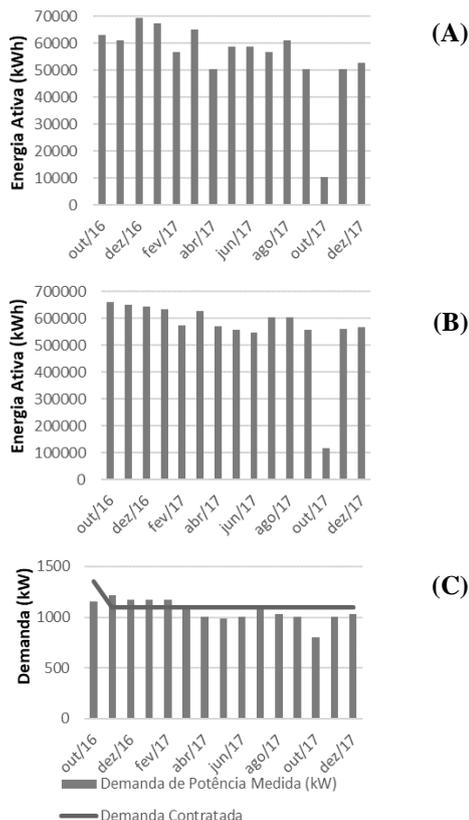


Figura 1. Gráficos no período de 15 meses (A) da Energia Ativa Consumida no Horário de Ponta; (B) da Energia Ativa Consumida no Horário de Fora Ponta; (C) da Demanda no Horário de Ponta; (D) da Demanda no Horário de Fora Ponta.

Nas Figuras 1 (A) e (B), pode-se notar que o consumo de energia ativa da fábrica, apesar de as oscilações, apresenta uma tendência de queda como decorrência dos trabalhos de redução de consumo energético já desenvolvidos. Pode-se ainda notar que o consumo de energia elétrica relativo ao mês de outubro de 2017 foi destoante com relação aos demais. Essa redução foi causada pela parada programada de fábrica para a realização de manutenção do forno, quando a maior parte dos equipamentos elétricos esteve desligada.

A partir das Figuras 1 (C) e (D), verifica-se que as demandas contratadas mudaram de 1350 kW para 1100 kW na ponta e de 1600 kW para 1250 kW na fora ponta a partir de novembro de 2016. Tais alterações ocorreram devido à potência anteriormente contratada ser superior às necessidades da fábrica, o que ocasionava custos desnecessários. O ajuste da faixa contratual, no entanto, fez com que a empresa pagasse multa pela demanda ultrapassada no período de novembro de 2016 a fevereiro de 2017. A adequação da demanda da fábrica à demanda contratada foi feita segundo um plano de ação da equipe de manutenção.

Outra característica do consumo de energia elétrica da fábrica é que o fator de potência de suas cargas está corrigido e é em média 0,99 indutivo, fazendo com que o seu consumo de reativos não seja tarifado, uma vez que o fator de potência é maior que o mínimo estabelecido (0,92 indutivo). Esta medida faz com que a empresa não tenha que pagar excedentes pela energia reativa, além de reduzir as perdas nas instalações internas por efeito Joule.

Para 2018, a empresa tem a meta de redução de 50 MWh no consumo mensal de energia elétrica. Tendo em vista a meta definida e as ações já propostas pela equipe de manutenção, mantendo o foco nos setores da fábrica que apresentam maiores oportunidades de efficientização energética: Sistema de Ar Comprimido; e Fábrica de Massa.

## 3 O SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

O sistema de ar comprimido deve atender as necessidades processuais, de forma que a pressão deve ser mantida dentro de uma faixa aceitável. De acordo com a Adene (2016), um sistema de ar comprimido ótimo é aquele em que a produção de ar comprimido

é garantida com o menor consumo energético possível, levando em consideração o sistema de geração instalado.

O sistema de geração de ar comprimido da fábrica é composto por cinco compressores, cuja disposição na sala de compressores pode ser vista no esboço apresentado na Figura 2.

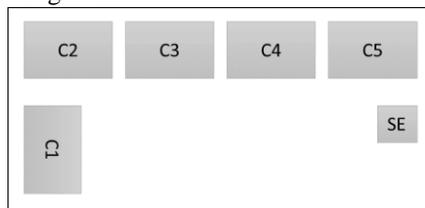


Figura 2. Esboço da disposição dos equipamentos na sala de compressores.

Na Figura 2, SE é a unidade secadora, C1 é o compressor 1, C2 é o compressor 2, e assim sucessivamente.

As características dos compressores variam entre três tipos distintos, conforme detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos compressores.

Tipo	Pressão de trabalho Máx. (bar)	Capacidade máxima FAD (l/s)		Potência (kW)
		Min.	Máx.	
GA 75 SVD	13	58,3	182	75
GA 160	7,4	-	475	160
GA 180 SVD	13	-	352	180

Na Tabela 1, a sigla FAD significa *Free Air Delivery* (Entrega efetiva de ar).

O compressor 1 é do tipo GA 75 SVD; os compressores 2 e 3 são do tipo GA 160 e os compressores 4 e 5 são do tipo GA 180 SVD.

De acordo com o fabricante, os compressores do tipo GA SVD possuem um controlador integrado que varia a velocidade do motor de acordo com a demanda de ar comprimido do consumidor final, resultando em uma economia de até 35% do consumo de energia pelo compressor.

Os cinco compressores são utilizados para a alimentação de duas linhas de distribuição: a alimentação da Fundação TCI (setor responsável pela produção das bacias a partir da massa) e a alimentação da Fundação em Alta Pressão – APR – (setor responsável pela produção das colunas, caixas e lavatórios, a partir da massa) e da Esmaltação (setor responsável pela esmaltação das peças).

Rocha (2005) afirma que o estudo do balanço energético de um sistema de ar comprimido é importante para identificar as perdas que reduzem a eficiência do sistema. A partir de então, é possível selecionar as oportunidades de melhorias para a eficiência do sistema.

## 2.1 Eficiência Energética nos Sistemas de Ar Comprimido

Rocha (2005) afirma que o estudo do balanço energético de um sistema de ar comprimido é importante para identificar as perdas que reduzem a eficiência do sistema. A partir de então, é possível selecionar as oportunidades de melhorias para a eficiência do sistema.

Viana *et al.* (2012) afirmam que a abordagem mais indicada para o conceito de compressão nos sistemas de ar comprimido é a que estuda os processos ao longo de um Volume de Controle, na qual um volume delimitado permeável aos fluxos de massa, calor e trabalho é representada. Na fronteira desse volume, as alterações das propriedades dos fluxos são observadas.

O trabalho específico de compressão em um Volume de Controle  $w$  [kJ/kg], em iguais condições de pressão, pode ser calculado de acordo com (1).

$$w = \int_1^2 v dp = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (1)$$

em que  $v$  [m<sup>3</sup>/kg] é o volume do gás a ser comprimido,  $p$  [Pa] é a pressão,  $n$  é o expoente da politrópica,  $R$  é a constante particular do gás [kJ/ kg·K] e  $T_1$  é a temperatura do ar aspirado [K], (Santos, 2007).

A partir de (1) pode-se observar que, para um mesmo valor de trabalho, pode-se aumentar a eficiência de compressão de ar ao se reduzir a temperatura do ar aspirado, uma vez que quanto mais baixa for esta temperatura, maior será a massa de ar aspirada pela mesma vazão volumétrica, (Rocha, 2005).

Além disso, a partir de Rocha (2005), a Tabela 2 foi adaptada para mostrar o percentual de potência economizada ou incrementada, tomando-se por referência a operação em 21°C.

Tabela 2. Variação do consumo elétrico dos compressores com a variação da temperatura do ar de aspiração.

Temperatura do ar de aspiração (°C)	Percentual de potência economizada, ou incrementada, com referência à temperatura de 21°C
-1	7,5 (economizado)
10	3,8 (economizado)
21	0
32	3,8 (incrementado)
43	7,6 (incrementado)

### 2.1.1 Temperatura da Sala de Compressores

Nas instalações da fábrica em estudo não há um sistema de exaustão ou de resfriamento na sala dos compressores, o que resulta no aquecimento do ambiente e na redução da eficiência do sistema de compressão de ar, com relação à temperatura de admissão de gás.

Na Figura 3 são mostradas termografias da sala de compressores, da sala ao lado da sala de compressores (utilizada como depósito de material de segurança), e do ambiente próximo às salas, a fim de se ter um comparativo entre as temperaturas nos ambientes distintos.

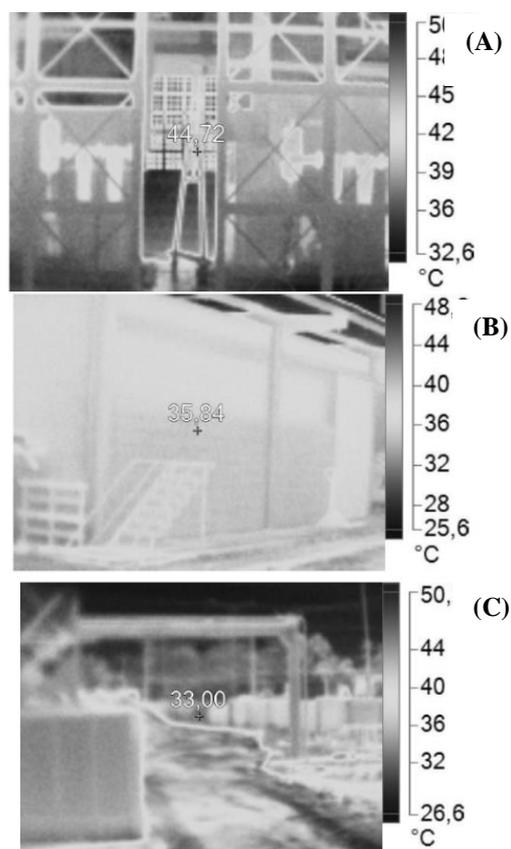


Figura 3. Termografias (A) da sala de compressores, (B) da sala de depósito, (C) do ambiente próximo às salas.

Observando-se a Figura 3, pode-se perceber que a faixa de temperatura da sala de compressores é composta por temperaturas mais elevadas, quando comparada a faixa de temperatura da sala de depósito e do ambiente próximo às salas. Enquanto a temperatura média da sala de compressores foi medida como 41,20°C, a temperatura média da sala ao lado foi 36,36°C, apresentando uma diferença de 4,84°C.

A partir dos dados da Tabela 2, por interpolação, pode-se perceber que, para as condições supracitadas, os compressores consomem em média 6,40% de potência a mais do que compressores que funcionam em 21°C. Se a temperatura média da sala fosse reduzida para 36,36°C, os compressores teriam 4,86% de incremento de potência com relação aos compressores funcionando em 21°C, mas teriam um decréscimo de 1,53% de potência com relação ao primeiro caso calculado.

A sala de compressores possui temperaturas mais elevadas devido ao sistema de resfriamento a ar dos compressores não ser projetado para exalar o ar quente para fora da sala, mas para a parte de trás dos compressores, dissipando o calor no ambiente onde os equipamentos estão instalados.

Esta falha na exaustão do ar quente proveniente do sistema de resfriamento dos compressores para fora da sala é ainda mais preocupante pelo fato de o ar usado no processo de compressão ser aspirado da própria sala de conversores. Este processo é, portanto, bastante ineficiente por uma falha de projeto, uma vez que a temperatura de aspiração do gás é diretamente proporcional à eficiência do processo de compressão, como já visto.

Conforme recomendado por Barros *et al.* (2015), deve-se evitar que o ar aspirado pelos compressores seja proveniente do interior do recinto onde estão instalados, podendo-se instalar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar externa à sala de compressores;

Ainda segundo Barros *et al.* (2015), quando os compressores são resfriados a ar, pode-se lançar o ar aquecido para fora do ambiente da sala de máquinas, com o cuidado de que o ar expelido não aqueça o ar de aspiração dos compressores.

### 2.1.2 Relação de Pressão

De acordo com (1), observa-se que o trabalho específico de compressão será menor o quanto menor for a pressão de trabalho ( $p_2$ ). Além disso, Adene (2016) afirma que, a cada 1 bar de acréscimo no valor da pressão de trabalho no sistema de ar comprimido, há um aumento de cerca de 7% no consumo elétrico dos compressores.

Logo, para reduzir o consumo de energia elétrica do sistema de geração de ar comprimido, é necessário que a pressão do ar gerado seja o mais próximo possível da pressão adequada para os equipamentos consumidores. Para isto, é necessário um controle rigoroso das perdas de carga, as quais são geralmente compensadas com o aumento da pressão de trabalho do sistema, (Viana *et al.*, 2012).

Portanto, para se reduzir a pressão de trabalho, deve-se primeiramente reduzir as perdas de carga e as fugas de ar do sistema de distribuição.

Em casos em que o consumo de ar é muito variável, a instalação de reservatórios de ar comprimido ou o redimensionamento dos reservatórios existentes pode ser uma alternativa viável para a redução de pressão de trabalho do sistema de geração.

### 2.1.3 Fugas de ar

Para que a geração aconteça de forma eficiente, um dos principais e mais básicos pontos é a garantia de que a distribuição esteja livre de fugas, evitando perdas na instalação. Em um sistema ideal, o limite de perdas por fugas é de 5% da capacidade gerada. No entanto, no setor industrial é comum encontrar vazamentos entre 10% e 20% da capacidade gerada.

As conexões dos sistemas de distribuição de ar comprimido são normalmente feitas por conexões rosca-das, flangeadas ou soldadas. A perda gradual de ve-

dação ocorre ao longo dos anos nas conexões rosqueadas e flangeadas, originando pontos de vazamento de ar comprimido, (Monteiro; Rocha, 2005).

Os autores citados ainda afirmam que o sistema de acoplamento de um equipamento à tubulação é a fonte da maioria das perdas do sistema de distribuição de ar. Tais acoplamentos são realizados por meio de juntas de vedação, as quais se desgastam com o uso e geram pontos de fuga de ar. Da mesma forma, as mangueiras utilizadas no sistema de acoplamento podem furar ou trincar.

Os sistemas de distribuição principais de ar comprimido da fábrica em estudo possuem cinco anos, apresentando estado precário de conservação. Portanto, de acordo com Rocha (2005), o provável percentual de fugas é entre 5% e 10% de todo o ar produzido.

Pela ausência de caudalímetros nas linhas de distribuição e nos pontos de consumo, não foi possível se fazer a estimativa do percentual dos vazamentos das duas linhas de distribuição da fábrica. Além disso, não existe equipamento instalado para medir a potência consumida pelos compressores, dificultando as possíveis estimativas de ganho com a implantação de melhorias.

Os pontos de fugas de ar comprimido perceptíveis ocorrem principalmente na fundição TCI, onde se ouve o chiado característico das fugas quando as bancas de fundição são colocadas para espaguetar (processo de retirada de umidade dos moldes de gesso através da injeção de ar comprimido).

A distribuição de ar comprimido nas bancas de fundição de bacias é feita da seguinte forma: uma linha de ar comprimido ramifica-se da linha secundária de distribuição e percorre toda a parte traseira da banca. A partir da linha de distribuição da banca, são feitas cerca de oitenta conexões (uma para cada lateral e outra para o pé de cada um dos moldes).

Ainda na parte de trás das bancas, as conexões da linha de distribuição se conectam a joelhos nos carrinhos através de mangueiras de Poliuretano – pu. A distribuição de ar através dos carrinhos ocorre por um tubo galvanizado acomodado na sua parte inferior, que chega à frente da banca e é controlada por válvulas, as quais são conectadas a partir de mangueiras de pu ao ponto de conexão com as partes dos moldes.

Os pontos críticos para a ocorrência de vazamentos são os pontos de conexão da linha de distribuição de ar comprimido e os joelhos dos carrinhos; as válvulas esfera, quando desgastadas; os conectores dos moldes; as mangueiras, quando trincadas ou rachadas; os tubos galvanizados, os quais podem estar bastante danificados em detrimento do estado de conservação da banca.

A falta de equipamentos de medição, na oportunidade, não permitiu que os percentuais de perda neste setor fossem medidos. No entanto, tais fugas precisam ser reduzidas ou eliminadas.

Para a redução dos pontos de fugas foram sugeridos: a modificação da tubulação de alimentação de ar comprimido das bancas, colocando-a para a parte da

frente da banca, de onde as válvulas esferas são diretamente conectadas à linha de ar e aos moldes através de mangueiras, eliminando-se dois pontos prováveis de vazamento; a implantação da manutenção autônoma nos setores que utilizam o ar comprimido a fim de se eliminar os pontos perceptíveis de vazamento logo que surgirem; a estruturação do calendário das inspeções periódicas no sistema de distribuição de ar, fazendo-se o estudo de viabilidade da aquisição de um medidor ultrassônico de fugas, ou a partir da contratação de uma empresa terceirizada para realizar a atividade; a instalação de medidores do consumo elétrico dos compressores, e de caudalímetros nas linhas de distribuição, a fim de se possibilitar a estimativa de vazamentos na linha.

#### 2.1.4 Perdas de Carga

Segundo Santos *et al.* (2007), as perdas de carga são provenientes do atrito do ar em movimento com as rugosidades da tubulação e conexões. Portanto, quanto maior for o fluxo de ar, maiores serão as perdas de carga. Os autores afirmam ainda que este problema no sistema de distribuição obriga o sistema gerador de ar comprimido a aumentar a pressão de trabalho para compensar as fugas, o que aumenta o consumo elétrico.

Monteiro e Rocha (2005) atentam para que os projetos das linhas de distribuição sejam feitos de forma a se evitar excesso de curvas e mudanças de direção exageradas, para se evitar as perdas de carga a serem vencidas pelo sistema de geração de ar comprimido. Além disso, os autores chamam atenção para o fato de que esta problemática leva a uma elevação da pressão de desarme dos compressores, aumentando o seu tempo de funcionamento.

Rocha (2005) afirma que, para que o sistema de ar comprimido tenha um bom funcionamento, apresentando o mínimo de perdas de carga, é necessário que a seleção dos compressores, dos reservatórios de ar, das tubulações, dos filtros, dos reguladores e das válvulas de controle seja feita de forma adequada.

O autor informa também que as perdas de carga são proporcionais ao quadrado da velocidade. De acordo com a hidrodinâmica do ar comprimido, a vazão de ar ( $Q$ ) em um tubo circular é igual ao produto da área de passagem ( $A$ ) com a velocidade do ar ( $v$ ).

Sejam dois tubos conectados, o primeiro com a área da seção transversal de passagem e velocidade do ar na seção de passagem iguais a  $A_1$  e  $v_1$ , respectivamente, e o segundo  $A_2$  e  $v_2$ , respectivamente. A vazão de ar através deste sistema pode ser calculada mediante a seguinte expressão:

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2. \quad (2)$$

Portanto, de acordo com (2), quanto maior for a seção transversal do tubo de distribuição, menor será a velocidade do ar através do tubo e menores também serão as perdas de carga ao longo da linha.

Na fábrica em estudo, os sistemas de distribuição são em linha aberta, que apresentam perdas de cargas

mais significativas do que os em linha fechada. Além disso, na fundição TCI há excesso de mudanças nos diâmetros dos tubos de distribuição de ar comprimido.

No Setor da Esmaltação, as tubulações de distribuição estão bastante sinuosas, o que aumentam as perdas de carga. Adicionalmente, em ambos os sistemas de distribuição, há excesso de curvaturas a 90°, que poderiam ter sido suavizadas, e conectores do tipo T, quando os mais recomendados são do tipo Y.

Para se amenizar as perdas de carga dos sistemas de alimentação da fábrica, as recomendações foram: realizar o mapeamento dos sistemas de distribuição; eliminar os pontos do sistema de distribuição que estiverem desativados; realizar estudo de viabilidade da modificação da distribuição secundária na fundição TCI, de forma que a tubulação secundária tenha maior seção transversal, reduzindo os diâmetros apenas nos pontos onde tal redução for realmente necessária.

#### 4 A FÁBRICA DE MASSA

A Fábrica de Massa é o setor da planta responsável pela produção de barbotina, massa que constitui as peças cerâmicas, a partir de matérias primas adquiridas de fornecedores externos e internos da unidade.

Nas etapas do processo produtivo da barbotina, os equipamentos que mais consomem energia elétrica são os moinhos de bola, ou moinhos Alsing, utilizados na etapa de moagem. O foco do trabalho de eficiência neste setor tem por objetivo a otimização da operação dos moinhos.

Segundo Ribeiro e Abrantes (2001), a redução do tamanho das partículas de materiais sólidos é feita para aumentar a velocidade de reação de determinada matéria prima, misturar diferentes materiais de forma mais uniforme e permitir a obtenção de um pó com características ideais para a sua utilização.

No caso dos processos cerâmicos, a granulometria e a reologia exercem influência determinante nas propriedades e comportamentos dos materiais durante a conformação, queima e nas características finais das peças.

A utilização de moinhos de bolas é difundida na indústria cerâmica para a moagem dos componentes duros (não plásticos) ou de pastas. A moagem neste tipo de moinho possui quatro variações: processo contínuo ou intermitente, moagem a seco ou a úmido. Geralmente, a indústria cerâmica utiliza moagem descontínua e a úmido.

Os moinhos de bolas são compostos por um cilindro metálico oco, que gira sobre o seu eixo horizontal. O revestimento interno do cilindro pode ser feito com borracha ou com material duro, sobre o qual rolam os corpos moedores e o material a ser moído, (Ribeiro; Abrantes, 2001).

Nesses moinhos a ação da moagem deriva dos choques, esmagamentos, cortes e atritos entre a mistura dos materiais com os corpos moedores. A eficiência do processo de moagem vai depender, dentre outros fatores, da velocidade de rotação, da quantidade

de bolas e da taxa de ocupação dos moinhos, (Ribeiro; Abrantes, 2001).

O setor Fábrica de Massa da planta contém oito moinhos com corpos moedores de alta densidade, dos quais sete possuem revestimento de borracha e um possui revestimento em alta alumina. A força motriz dos moinhos é proveniente de motores de indução de 60 c.v. (ou 44,13 kW), seis polos e velocidade nominal de 1160 rpm.

#### 3.1 Eficiência Energética no processo de moagem em moinhos de bolas

Tavares (s/d) afirma que a energia gasta com processos de fragmentação de materiais é estimada em 3% do consumo total de energia do mundo. Pelo fato de o conceito de eficiência energética não estar bem definido para os processos de moagem, não é possível avaliar qual seria um patamar aceitável para ser atingido.

Ainda segundo o autor citado, como o processo de comonuição consiste na fratura sucessiva das partículas a partir de esforços mecânicos resultantes de processos industriais, a definição adequada de eficiência energética requer o cálculo da energia mecânica necessária para a obtenção de determinada distribuição granulométrica do produto.

Devido à complexidade que envolve a determinação da energia mecânica necessária para o alcance da granulometria desejada para o produto processado, este trabalho se aterá à identificação de fontes de desperdício de energia nos moinhos da fábrica de massa da unidade em estudo.

Este estudo, portanto, dar-se-á pela proposição de soluções, a partir da determinação dos pontos ótimos de operação dos moinhos, para a operação no ponto mais ao ponto ótimo de moagem, o que reduzirá o tempo necessário para a realização do processo.

##### 3.1.1 Velocidade de Rotação Ótima

De acordo com Ribeiro e Abrantes (2001), a velocidade ótima de rotação dos moinhos de bola é calculada de acordo com a sua velocidade crítica ( $V_{AC}$ ), sendo da ordem de 75% da velocidade crítica para moinhos com corpos moedores de baixa densidade e da ordem de 60% para moinhos com corpos moedores de alta densidade, respectivamente.

A velocidade crítica, por sua vez, é a velocidade à qual a ação da moagem é nula, pois o peso dos corpos moedores iguala-se à força centrífuga. A velocidade crítica pode ser encontrada a partir de (3).

$$V_{AC} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}, \quad (3)$$

em que  $D$  é o diâmetro interno do moinho, (Ribeiro; Abrantes, 2001).

Quando a aceleração centrípeta é muito inferior à aceleração da gravidade ocasiona um baixo grau de moagem. Um bom grau de moagem é atingido quando o ângulo entre o ângulo de elevação das bolas e o

plano horizontal está compreendido entre 45° e 60°, fazendo com que as bolas rolem em cascata até a parte inferior do moinho. A moagem anula-se quando o moinho atinge ou supera a velocidade crítica, (Ribeiro; Abrantes, 2001).

Para os moinhos em estudo, diâmetro interno é igual a 2 metros e, a partir de (3), a sua velocidade angular crítica é de, aproximadamente, 29,91 rpm. A velocidade de rotação ótima será, portanto, 17,95 rpm (cerca de 60% da velocidade crítica encontrada).

O sistema de acoplamento dos moinhos da planta possui o eixo do motor acoplado a uma primeira polia, polia motora D1, de diâmetro igual a 0,20 metros. A segunda polia movida D2, de diâmetro igual a 1,90 metros, está conectada à D1 por meio de uma correia e, portanto, ambas possuem a mesma velocidade tangencial.

A terceira polia, polia motora D3, de diâmetro igual a 0,30 metros, rotaciona à mesma velocidade angular de D2, por estarem acopladas ao mesmo eixo. A polia D4, de diâmetro igual a 2,30 metros (polia movida), está conectada à D3 por meio de uma correia e, por conseguinte, possuem a mesma velocidade tangencial.

Considerando os valores dos diâmetros das polias e a velocidade angular nominal do motor, pode-se encontrar a velocidade angular nominal do moinho aproximadamente igual a 15,93 rpm, a partir de (4).

$$\omega_{moinho} = \frac{R_{D1} \times R_{D3}}{R_{D2} \times R_{D4}} \times \omega_{motor}, \quad (4)$$

em que  $\omega_{motor}$ ,  $\omega_{moinho}$ ,  $\omega_{D2}$  e  $\omega_{D3}$  são as velocidades angulares do motor, do moinho, da polia D2 e da polia D3, respectivamente;  $R_{D1}$ ,  $R_{D2}$ ,  $R_{D3}$  e  $R_{D4}$  são os raios das polias D1, D2, D3 e D4, respectivamente.

No entanto, devido ao escorregamento e desgaste no sistema de polias, a velocidade angular real medida nos moinhos é igual a 15 rpm, 5,82% menor do que o seu valor teórico.

Para a redução do tempo de moagem a partir da otimização da velocidade real de rotação do moinho, a proposta inicial foi a alteração no projeto da polia D1 para que o seu novo diâmetro fosse 0,215 metros, de forma que a velocidade de rotação do moinho teórica fosse incrementada para 17,12 rpm, aproximando-se da velocidade ótima de moagem. O sistema, no entanto, ainda não foi montado e, portanto, os resultados não puderam ser apurados para fins de comparação com os valores teóricos.

De forma grosseira, sem a alteração na polia D1, considerando a velocidade angular medida dos moinhos (15 rpm) e que a moagem dura em média 8 h, os moinhos precisam de 7200 rotações para deixar a barbotina em uma distribuição granulométrica aceitável para o consumo na fábrica. Com a alteração da polia D1, se a velocidade do moinho for incrementada para 17 rpm, o tempo de moagem seria reduzido em quase 1 h.

Após a quantificação da redução do tempo de moagem e da modificação do consumo elétrico do motor a partir da aproximação da velocidade de rotação à velocidade ótima de rotação, poderá se fazer o estudo de

viabilidade da aplicação da alteração aos demais motores.

Além disso, o emprego de inversores para o controle da velocidade de rotação dos moinhos deve ser analisado. No entanto, como inversores são equipamentos caros, investimento na ordem de R\$ 20 mil para cada moinho, a análise dos ganhos reais de rendimento e de eficiência com a aproximação da velocidade de rotação dos moinhos à velocidade ótima de rotação deverá ser efetuada para a posterior análise de viabilidade econômica da instalação de inversores.

### 3.1.2 Quantidade de Corpos Moedores

A quantidade ótima de bolas nos moinhos Alsing é de 50% a 55% da sua capacidade líquida. Entretanto, como há espaços vazios entre as bolas, o espaço real ocupado pelos corpos moedores é aproximadamente 60% do volume total dos moinhos.

A partir de (5), pode-se calcular a quantidade ótima de bolas para se usar em um moinho.

$$P = V \times d_B \times p \times 0,60; \quad (5)$$

em que  $P$  é a quantidade ótima de bolas [kg],  $V$  é o volume útil do moinho [l],  $d_B$  é a massa específica das bolas [kg/l] e  $p$  é a taxa de ocupação aparente das bolas (de 0,50 a 0,55).

Tendo em vista que o volume útil dos moinhos da planta é 9200 litros, o peso específico das bolas de alta alumina é 3,5 kg/l e a taxa de ocupação aparente das bolas é 0,50. De acordo com (4) tem-se que a quantidade ótima de bolas é de 9660 kg.

A quantidade de bolas de alta alumina utilizadas atualmente para o *setup* dos moinhos é de 9200 kg, distribuídos entre esferas de 60 mm de diâmetro (30%), 50 mm de diâmetro (40%) e 40 mm de diâmetro (30%).

Para otimizar o sistema de moagem, a proposta é de se utilizar 9660 kg de bolas de alta alumina no *setup* dos moinhos, aplicando-se o aumento de forma gradual com incrementos de 115 kg e observando-se o efeito do incremento no processo de comonuição.

Após a análise, a nova quantidade de corpos moedores poderá ser padronizada e os ganhos de produção devem ser enfatizados.

### 3.1.3 Revestimento Interno dos Moinhos

O revestimento de alta alumina foi implantado em um dos moinhos para a comparação do rendimento da moagem com a mudança no revestimento com o rendimento da moagem com o revestimento de borracha, tradicionalmente utilizado.

Em média, os moinhos com revestimento de borracha realizam um ciclo de moagem em 8 h, enquanto o moinho com revestimento de alta alumina o realiza em 7 h.

A redução de 1 h de operação do moinho é um resultado significativo não apenas para a redução de custos energéticos, como também para o aumento da

produtividade da fábrica de massa, que foi incrementada em 12,5% neste moinho.

O revestimento de alta alumina, com relação ao revestimento de borracha, custa 1,39% a mais, reduz em 12,5% o tempo total de moagem e possui vida útil até 5 vezes maior.

Desconsiderando a partida e a frenagem do motor, haverá a redução de 12,5% do consumo de energia elétrica por moagem em cada motor. Estimando-se pelo valor da potência consumida motor durante a moagem (aproximadamente 33 kW) e considerando que em média 6 motores funcionam por turno, o consumo será reduzido em cerca de 17800 kWh por mês.

Tem-se, portanto, que a alteração do tipo de revestimento dos moinhos é uma mudança eficiente e de baixo investimento, uma vez que tanto o desempenho quanto a vida útil do material são superiores.

A modificação será implantada em todos os moinhos, segundo o cronograma de troca de revestimento por desgaste da vida útil já estabelecido pelo setor de manutenção.

#### 4 Conclusão

A falta de registro do consumo elétrico diferenciado por setores dificulta o diagnóstico de desperdícios de energia dentro de uma fábrica. Faz-se necessário, além do acompanhamento do consumo, a definição de metas para cada setor, incentivando-se a conscientização do uso de energia em cada área fabril.

No tocante ao Sistema de Ar comprimido, observou-se que a falha no projeto da instalação dos equipamentos reduz a eficiência do processo de compressão de ar, uma vez que as altas temperaturas dos compressores são dissipadas dentro do ambiente do qual o ar de aspiração é proveniente. Além disso, não há rota de inspeção definida para a detecção e eliminação de fugas de ar no sistema de distribuição, as quais podem ser uma das principais fontes de desperdício de ar comprimido.

O processo de moagem também apresenta importantes oportunidades de otimização que devem ser exploradas e avaliadas, tanto no quesito de eficiência, quanto no quesito de produtividade, quando se trata de redução no tempo de execução dos procedimentos.

A aquisição de equipamentos de registro de consumo de equipamentos seria essencial à otimização do uso dos equipamentos de potências eleva. Assim, a otimização dar-se-ia a partir da determinação do padrão de uso da carga e da quantificação de ganhos ao se aplicar projetos de melhorias.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe de manutenção da fábrica onde o estudo foi realizado, especialmente a Cícero Ferreira, Daniel Cruz, Eduardo Livi e Marcos Carvalho; e ao coordenador da Fábrica de Massa, Marcos Pantoja, pelas contribuições relevantes.

#### Referências

- ADENE – Empresa para Energia 2016. *Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido*. Acesso em nov. 2017. Disponível em: <<https://www.adene.pt/>>.
- Barros, B. F., Borelli, R., Gedra, R. L. (2015). *Eficiência Energética: Técnicas de Aproveitamento, Gestão de Recursos e Fundamentos*. São Paulo: Érica. 152 p.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2010). *Eficiência Energética na Indústria e nas Residências*. Rio de Janeiro, RJ – Brasil: EPE.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2017). *Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro: EPE. Acesso em 28 de agosto de 2017. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/>>.
- Monteiro, M. A. G.; Rocha, C. A. (2005). *Eficiência energética em sistemas de ar comprimido*. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel. 87 p. (Manual Prático).
- Ribeiro, M. J. P. M., Abrantes, J. C. C. (2001). Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. *Cerâmica Industrial*. Portugal, v. 6, n. 3, março/abril. Bimestral. Acesso em: 25 fev. 2018. Disponível em: <[www.ceramicaindustrial.org.br](http://www.ceramicaindustrial.org.br)>.
- Rocha, N. R. (2005) *Eficiência energética em sistemas de ar comprimido*. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel. 208 p. (Livro Técnico).
- Santos, A. H. et al. (2007). *Eficiência Energética: Teoria e Prática*. 1ª ed.. Itajubá, MG: Fupai. 224p.
- Tavares, L. M. (s/d). *Um Novo Método para o Cálculo da Eficiência Energética de Moinhos Industriais*. Acesso em 03 de março de 2018. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10093/>>.
- Thumann, A. (2007). *Handbook of energy audits* (7 ed.). Lilburn: The Fairmont Press.
- Viana, A. N. et al. (2012). *Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações*. 1ª ed. Campinas, São Paulo, Brasil: Fupai.