



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

BRUNA LARISSA LIMA CRISOSTOMO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA DE LOUÇAS SANITÁRIAS: ESTUDO DE CASO

Campina Grande
2018

BRUNA LARISSA LIMA CRISOSTOMO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA DE LOUÇAS SANITÁRIAS: ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor Benedito Antonio Luciano, D. Sc.

Campina Grande
2018

BRUNA LARISSA LIMA CRISOSTOMO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA DE LOUÇAS SANITÁRIAS: ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em / /

Jalberth Fernandes de Araujo, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Benedito Antonio Luciano, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha mãe, Maria Irione, que sempre me incentivou a lutar pelos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades que coloca em meus caminhos.

Agradeço aos meus pais, Maria Irione e José Nilton (*in memoriam*) por terem colocado os seus filhos como projeto principal de suas vidas, dedicando todo amor e atenção necessários para nos tornarmos pessoas humanas, empáticas e guerreiras. Toda educação e incentivo que me deram foram essenciais para que eu perseguisse os meus objetivos.

Agradeço ao meu irmão, Bruno, por me motivar a ser uma pessoa melhor todos os dias.

Agradeço ao meu namorado, Rodrigo Guercio, por todo amor, por ter sido o meu maior suporte em um ano tão difícil, por nunca ter deixado de acreditar em mim e por nunca me deixar perder a motivação.

Agradeço ao gerente Saulo Pimentel, por me permitir o desenvolvimento deste trabalho, bem como à equipe de manutenção, em especial Cícero, Daniel, Marcos e Eduardo, por todo o suporte e ao coordenador da Fábrica de massa, Pantoja, pelos direcionamentos.

Agradeço aos professores e funcionários da UFCG, sobretudo aos do Departamento de Engenharia Elétrica, por terem sido solícitos e prestativos, sempre à disposição para ajudar.

Ao meu orientador Benedito Luciano, que desde o terceiro período da graduação orientou-me no âmbito acadêmico, profissional e pessoal, tornando-se um importante apoio durante todo o curso: muito obrigada!

Agradeço a toda a minha família e aos meus amigos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

“Quem tem fé não precisa de sorte.”

Juarez de Castro.

RESUMO

A indústria almeja a redução de custos para ganhar espaço em um mercado consumidor cada vez mais competitivo. Para isto, trabalhos no âmbito da efficientização energética são a forma mais construtiva e efetiva de reduzir os gastos com insumos energéticos, visto que custo da energia é um dos fatores de peso na constituição do custo final dos produtos. Neste contexto, um estudo sobre eficiência energética, com foco no consumo de energia elétrica, foi desenvolvido em uma fábrica de louças sanitárias, localizada na cidade de João Pessoa, Paraíba. O trabalho *in loco* 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 fará parte de um projeto redução de custos.

Palavras-chave: Auditoria Energética, Eficiência Energética, Redução de Custos.

ABSTRACT

The industry aims to increase its market share by reducing production costs. Therefore, once electrical energy costs are significant on the final product costs composition, improving energy efficiency in industries is one of the most constructive, cost-effective ways to address the challenge of high energy prices. In this context, an energy efficiency study focused in electricity consumption was 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 will be built as part of a huge costs reduction project.

Keywords: Energy Efficiency, Energy Audit, Costs Reduction.

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Geral	11
1.1.2	Específicos	11
1.2	Estrutura do Trabalho	11
1.3	Etapas e Cronograma	12
2	A Fábrica.....	13
3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	Eficiência Energética	15
3.2	Auditoria Energética	16
4	Perfil do consumo de energia elétrica	18
5	Sistemas de ar comprimido	21
5.1	Sistema de ar comprimido em estudo	22
5.2	Aumento da Eficiência Energética.....	25
5.2.1	Temperatura na sala de compressores	27
5.2.2	Relação de pressão.....	32
5.2.3	Fugas de ar.....	33
5.2.4	Perdas de Carga	37
6	Fábrica de Massa	40
6.1	Moinhos de bolas	41
6.2	Moinhos de bolas da unidade em estudo	42
6.2.1	Aumento da Eficiência Energética	42
7	Conclusões	50
	Referências	51
	ANEXO A – Método prático para quantificar os vazamentos de uma instalação	53

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por energia elétrica, juntamente à necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, fez com que a lei da eficiência energética fosse criada em 2001. O principal objetivo desta lei era determinar metas de eficiência para todos os equipamentos regulamentados. Além disso, em 2006, o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030 determinou que de 2007 até 2030 o consumo final de energia elétrica fosse diminuído em 10% por meio do aumento da eficiência dos sistemas energéticos, (Ministério de Minas e Energia - MME, 2007). Estas são algumas medidas tomadas para incentivar a redução do consumo energético e garantir que a demanda seja atendida de forma sustentável.

Com a crise hídrica do Brasil que se iniciou em 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 qual é 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.

É neste contexto de eficiência energética que este Trabalho de Conclusão de Curso – TCC está inserido, partindo do diagnóstico energético de uma fábrica louças sanitárias localizada em João Pessoa, Paraíba, para realizar estudos e propor medidas de efficientização energética técnica e economicamente viáveis, reduzindo perdas e eliminando desperdícios.

Por motivos contratuais e de segurança industrial, várias informações que são confidenciais e proibidas para uso externo foram ocultadas neste relatório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Apresentar um trabalho monográfico de conclusão de curso sobre as potencialidades de efficientização energética em uma indústria de louças sanitárias localizada em João Pessoa, Paraíba.

1.1.2 ESPECÍFICOS

1. Realizar uma revisão bibliográfica, objetivando estabelecer um estudo sistemático sobre o uso eficiente de energia no setor industrial;
2. Realizar um diagnóstico energético objetivando apresentar um levantamento quantitativo das formas de energia disponíveis e utilizadas no âmbito da planta industrial;
3. Apresentar sugestões economicamente viáveis de como promover o uso eficiente da energia, reduzindo perdas e eliminando desperdícios, sem que tais ações resultem em perdas de produtividade para a empresa.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em sete Capítulos, dos quais este é o primeiro, dedicado à introdução. No Capítulo 2 a fábrica onde o estudo foi realizado é apresentada. Em seguida, no Capítulo 3, uma revisão bibliográfica acerca de eficiência energética e de auditoria energética é feita. No Capítulo 4, o perfil de consumo de energia elétrica da planta em estudo é detalhado. Os sistemas de ar comprimido são apresentados no Capítulo 5, aprofundando-se no sistema de ar comprimido da fábrica e nas ações de efficientizações recomendáveis. A fábrica de massa é detalhada no Capítulo 6, detalhando-se na otimização dos moinhos de bola descontínuos. No Capítulo 7, as conclusões são apresentadas.

1.3 ETAPAS E CRONOGRAMA

As etapas de elaboração deste trabalho foram:

1. Pesquisa e revisão bibliográfica;
2. Sistematização dos estudos mais relevantes sobre o tema do TCC;
3. Realização do diagnóstico energético da fábrica;
4. Preparação, elaboração e apresentação do Trabalho Final.

Tomando como base o período letivo 2017.2 e a duração do estágio integrado na empresa em que o estudo de caso foi desenvolvido, o TCC foi realizado de acordo com o cronograma apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Cronograma de realização de atividades do TCC.

Etapas	Nov. 2017	Dez. 2017	Jan. 2018	Fev. 2018	Mar.2018
1					
2					
3					
4					

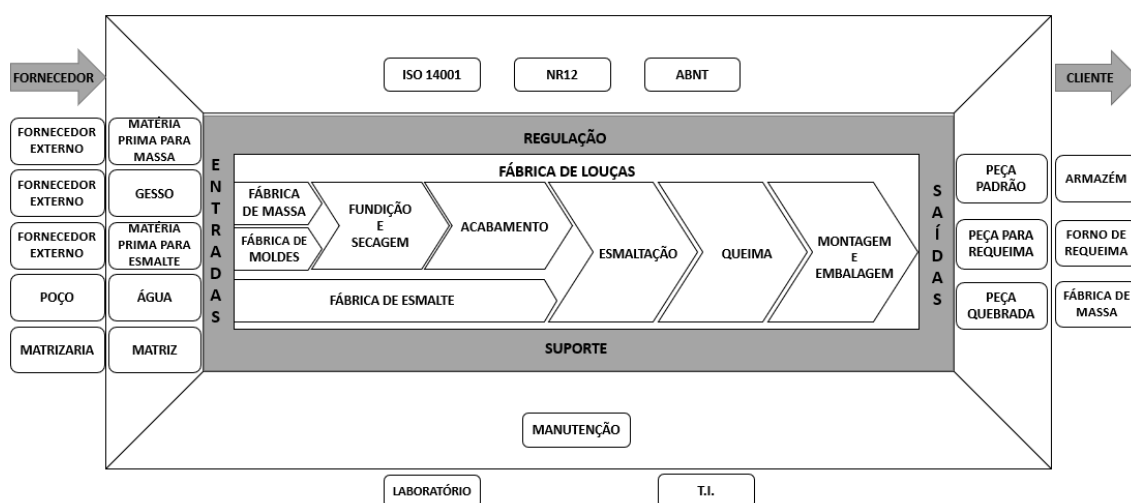
Fonte: Autoria própria, 2018.

2 A FÁBRICA

Com 30 mil metros quadrados de área construída e capacidade produtiva de dois milhões de peças por ano, esta fábrica de louças sanitárias é localizada em João Pessoa – PB.

O Diagrama de Escopo e Interfaces do Processo – DEIP – da unidade fabril em estudo pode ser visto na Figura 1.

Figura 1. Diagrama de Escopo e Interfaces do Processo – DEIP da fábrica em estudo.



Fonte: Autoria própria, 2018.

As principais etapas do processo produtivo são: produção de massa, produção de moldes, produção do esmalte, fundição (ou conformação), secagem, aplicação do esmalte (ou esmaltação) e queima.

As chamadas Fábricas Auxiliares são os setores que, a partir da matéria-prima advinda de fornecedores internos ou externos, produzem os moldes de gesso (fábrica de moldes); a barbotina, massa da qual se constitui as peças cerâmicas, (fábrica de massa); e o esmalte (fábrica de esmalte).

O setor da fundição produz peças a partir da capilarização da água da barbotina através dos moldes de gesso, etapa de conformação das peças. As atividades desenvolvidas no setor da fundição envolvem um processo artesanal no acabamento das peças, tendo importante participação da mão de obra na sua execução.

A secagem das peças ocorre em duas etapas, sendo a primeira uma perda de umidade para o ambiente, em que as peças recém geradas esperam em filas por pelo menos doze horas antes de serem inseridas em uma estufa, onde permanecem por mais 9 horas.

Após a secagem, as peças são inspecionadas, de forma que as peças com defeitos não corrigíveis são destinadas à quebra e as peças com defeitos corrigíveis são enviadas para a barreira, onde colaboradores fazem as devidas correções. As peças em bom estado são então esponjadas e levadas para serem esmaltadas.

No setor da esmaltação, as peças recebem uma fina camada de esmalte, aplicada para impermeabilizar por fins estéticos, decorativos e higiênicos.

As peças são então levadas para a queima ou sinterização, onde mudanças físico-químicas ocorrem na massa e no esmalte. Após esta etapa, as peças já estão com a sua aparência final.

Na última etapa, as peças são segregadas em peças padrões, que são destinadas ao armazém; peças com defeitos corrigíveis a frio, que são reparadas e designadas ao armazém; peças com defeitos consertáveis a quente, que são corrigidas e enviadas para serem requeimadas; e peças com defeitos não corrigíveis, que são destinadas para a quebra.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De acordo com Oliveira (2015), a definição de eficiência energética limitar-se-ia aos processos em que há conversão de energia e em que as formas inicial e final são visíveis ou perceptíveis nas suas diferentes formas, no contexto da física. Já no âmbito industrial, a Eletrobrás *et al.* (2009) afirma que, para se obter eficiência energética, deve-se utilizar processos e equipamentos mais eficientes, a fim de se reduzir desperdícios no consumo de energia elétrica, sem que isso prejudique a qualidade da produção de bens ou prestação de serviços. Além disso, devem-se utilizar práticas que tornem os processos, produtos e ações ótimos, diminuindo ao máximo suas perdas (ESTEVES & MOURA, 2010).

De maneira geral, os processos de efficientização são constituídos de redução de perdas e eliminação de desperdícios. O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2001) afirma que a melhoria da eficiência é sinônimo de redução do consumo de energia primária necessária para produzir um determinado serviço de energia, que pode ocorrer em qualquer etapa da cadeia do uso de energia, como também pode ser proveniente de substituições de uma forma de energia por outra em seu uso final. O INEE ainda afirma que eficiência energética é distinta de racionamento de energia e de “racionalizações forçadas”, em que o objetivo é a redução do serviço energético, e não a redução do consumo da energia para a realização do mesmo serviço.

A eficiência energética pode também ser entendida 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.

Para se promover a efficientização energética, faz-se necessário o emprego de conceitos dos campos da engenharia, da economia e da administração aos sistemas de energia. Dada à complexidade desses sistemas, métodos e técnicas são utilizadas para se

definir as perdas e melhorar o desempenho nos processos de transporte, armazenamento e distribuição de energia. 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).

3.2 AUDITORIA ENERGÉTICA

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 listam ainda termos que são empregados com o mesmo significado: análise energética, diagnóstico energético.

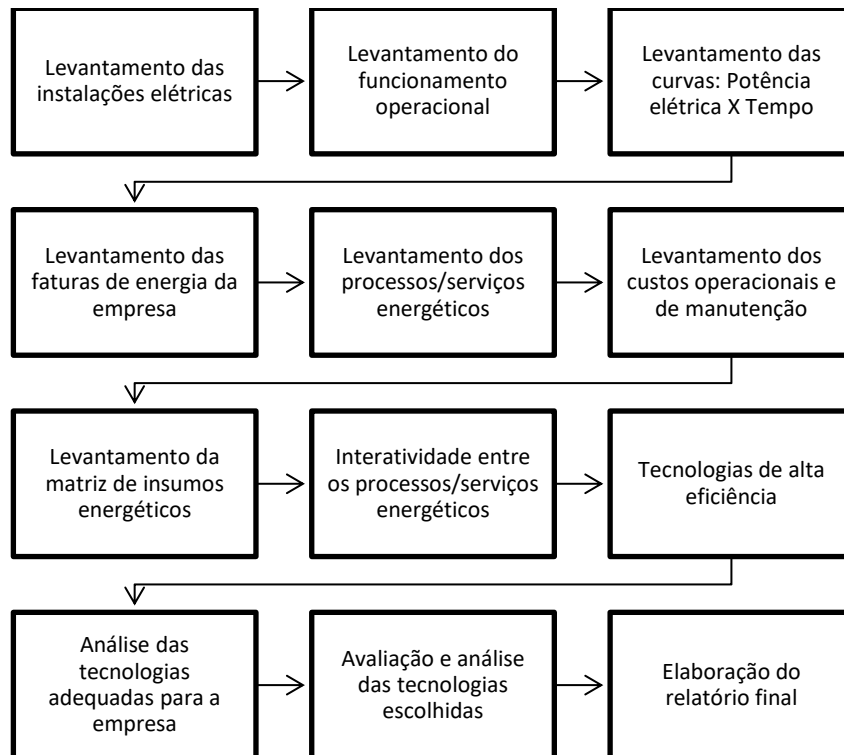
De acordo com Thumann (2007), em termos práticos, auditoria energética pode ser definida simplesmente como um processo de estudo do sistema de energia, a fim de se identificar onde o prédio ou a planta usa energia e verificar oportunidades de otimização do uso dos recursos energéticos.

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 contas de energia consumidas no intervalo de pelo menos um ano, período suficientemente necessário para detectar variações de consumo decorrentes de fatores externos – como variações climáticas – e internos – 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.

O diagrama de blocos das etapas do diagnóstico energético detalhado proposto por Souza Filho (2001) é apresentado na Figura 2.

Figura 2. Diagrama de Blocos das etapas do diagnóstico energético.



Fonte: (SOUZA FILHO, 2001).

Ainda segundo Souza Filho (2001), as metas do diagnóstico energético são:

- Sensibilizar a empresa sobre a importância da eficiência energética;
- Avaliar e quantificar o estado atual da eficiência energética na empresa (conscientização, conhecimento, engajamento, relações de causa e efeito e outras);
- Identificar os pontos de prioridade no trabalho de efficientização energética;
- Estruturar a criação interna da Comissão Interna de Gestão de Energia – CIGE;
- Elaborar um plano inicial de melhorias para implantar as ações recomendadas.

4 PERFIL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

A primeira etapa do diagnóstico energético realizado na planta foi o levantamento das faturas energéticas no período de quinze meses, de outubro de 2016 a dezembro de 2017, conforme pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2. Dados das faturas energéticas de outubro de 2016 a setembro de 2017.

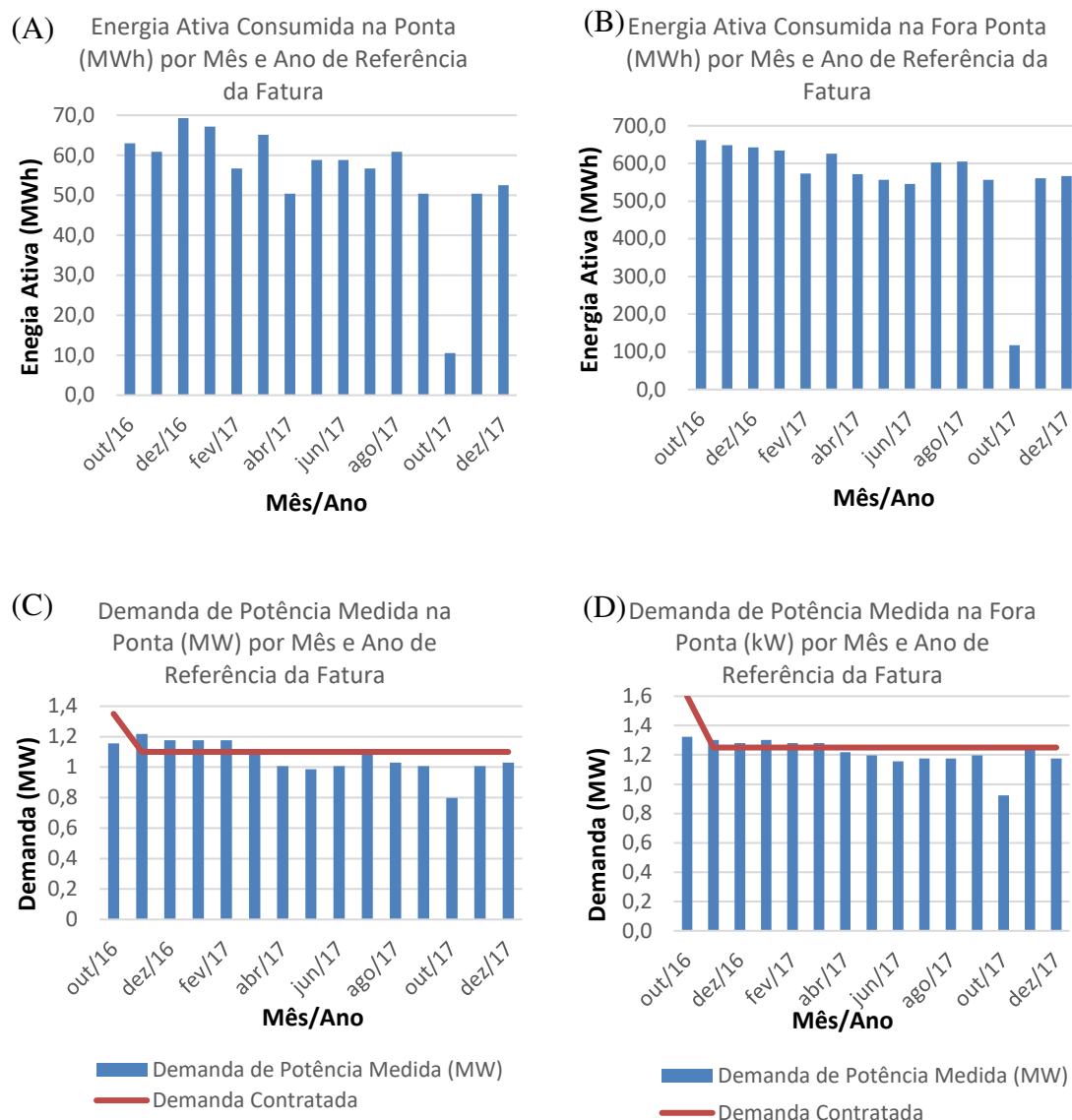
Mês/ ano	Ponta				Fora Ponta			Total de dias
	Energia Ativa (kWh)	D (kW)	DU (kW)	DNC (kW)	Energia Ativa (kWh)	D (kW)	DNC (kW)	
out/16	63000	1155	0	195	661500	1323	277	31
nov/16	60900	1218	118	0	648900	1302	0	30
dez/16	69300	1176	76	0	642600	1281	0	31
jan/17	67200	1176	76	0	634200	1302	0	31
fev/17	56700	1176	76	0	573300	1281	0	28
mar/17	65100	1092	0	8	625800	1281	0	31
abr/17	50400	1008	0	92	571200	1218	32	30
mai/17	58800	987	0	113	556500	1197	53	31
jun/17	58800	1008	0	92	546000	1155	95	30
jul/17	56700	1113	0	0	602700	1176	74	31
ago/17	60900	1029	0	71	604800	1176	74	31
set/17	50400	1008	0	92	556500	1197	53	30
out/17	10500	798	0	302	117600	924	326	31
nov/17	50400	1008	0	92	560700	1260	0	30
dez/17	52500	1029	0	71	567000	1176	74	31

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tabela 2, D é a Demanda, DU é Demanda Ultrapassada e DNC é Demanda Não Consumida.

Tomando como base os dados apresentados na Tabela 2, foram elaborados os gráficos do consumo de energia e das demandas (D) nos horários de ponta e de fora ponta, a fim de se facilitar a visualização do comportamento do consumo neste período, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3. 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.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Nas Figura 3 (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 Figura 3 (C) e 3 (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.

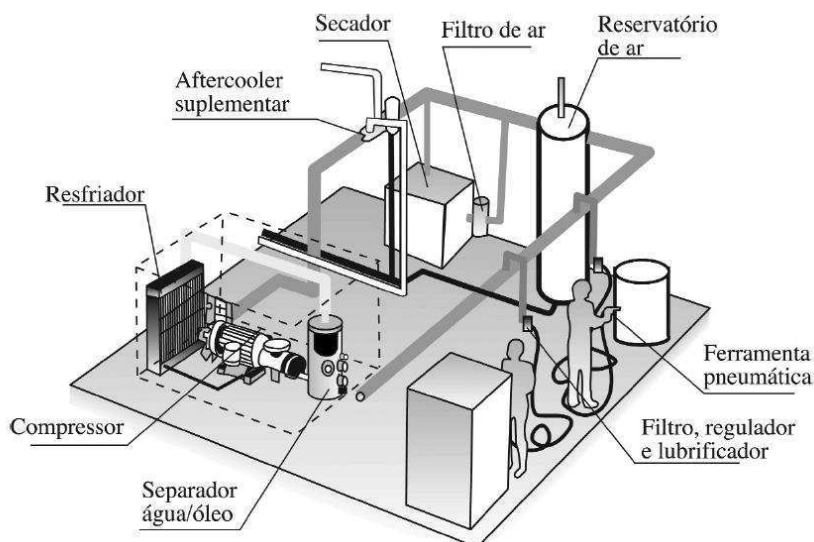
Para 2018, a empresa tem a meta de redução de 50 MWh no consumo mensal de energia elétrica. Tendo em vista a meta definida e as ações já propostas pela equipe de manutenção, este diagnóstico terá enfoque nos setores da fábrica que apresentam maiores oportunidades de efficientização energética: Sistema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

5 SISTEMAS 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 (s/d), 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.

Na Figura 4 é apresentada uma esquematização básica de um sistema de ar comprimido, conforme concebido por Monteiro e Rocha (2005).

Figura 4. Esquema de um sistema de ar comprimido.



Fonte: (MONTEIRO; ROCHA, 2005).

De acordo com Monteiro e Rocha (2005), o sistema de geração de ar comprimido é geralmente composto por compressores, motores e acionamentos, controladores eletrônicos, sistemas auxiliares de tratamento de ar, reservatórios e acessórios. Este sistema é responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, atuando na elevação da pressão do ar captado a partir da sua compressão.

O elemento compressor é responsável pela captação e elevação da pressão do ar, enquanto os motores elétricos fornecem a energia mecânica para o funcionamento do compressor. A regulagem da quantidade de ar comprimido que será produzida é feita pelos controladores. Os equipamentos de tratamento de ar eliminam contaminantes e

condensados do ar comprimido e os acessórios são utilizados para manter o funcionamento adequado do sistema, de acordo com os requisitos de qualidade do consumidor final (MONTEIRO; ROCHA, 2005).

Os sistemas de distribuição são compostos pelas tubulações que levam o ar comprimido do sistema gerador ao local de consumo, devendo entrar um ar limpo, estável e seco, além de usar reguladores para adequar as características do ar comprimido distribuído às necessidades do uso. Para isto, linhas de distribuição de ar comprimido podem apresentar reservatórios de ar comprimido e diversas linhas de distribuição que operam em diferentes pressões (MONTEIRO; ROCHA, 2005).

Os reservatórios de ar são utilizados principalmente em sistemas que devem manter baixos níveis de variação de pressão na linha de abastecimento. Adicionalmente, eles ajudam a coletar condensados, os quais usualmente são drenados.

Viana *et al.* (2012) afirmam que para a eficiência, segurança e economia de um sistema de distribuição de ar comprimido, três pontos são os mais importantes:

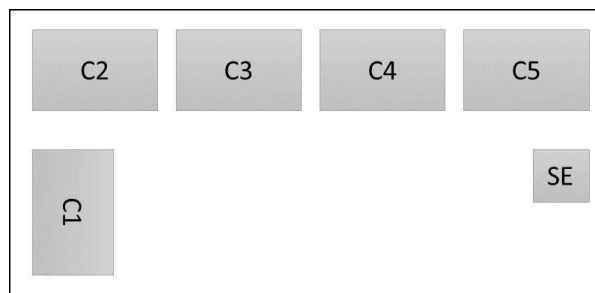
- Queda de pressão adequada;
- Fugas mínimas;
- Eficiência na separação de condensados.

De acordo com os autores supracitados, os sistemas de distribuição deveriam ser projetados para que a queda de pressão máxima entre o ponto de entrega do compressor e o ponto de consumo mais distante fosse de 0,3 bar, ou 0,5 bar para sistemas muito extensos.

5.1 SISTEMA DE AR COMPRIMIDO EM ESTUDO

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 5.

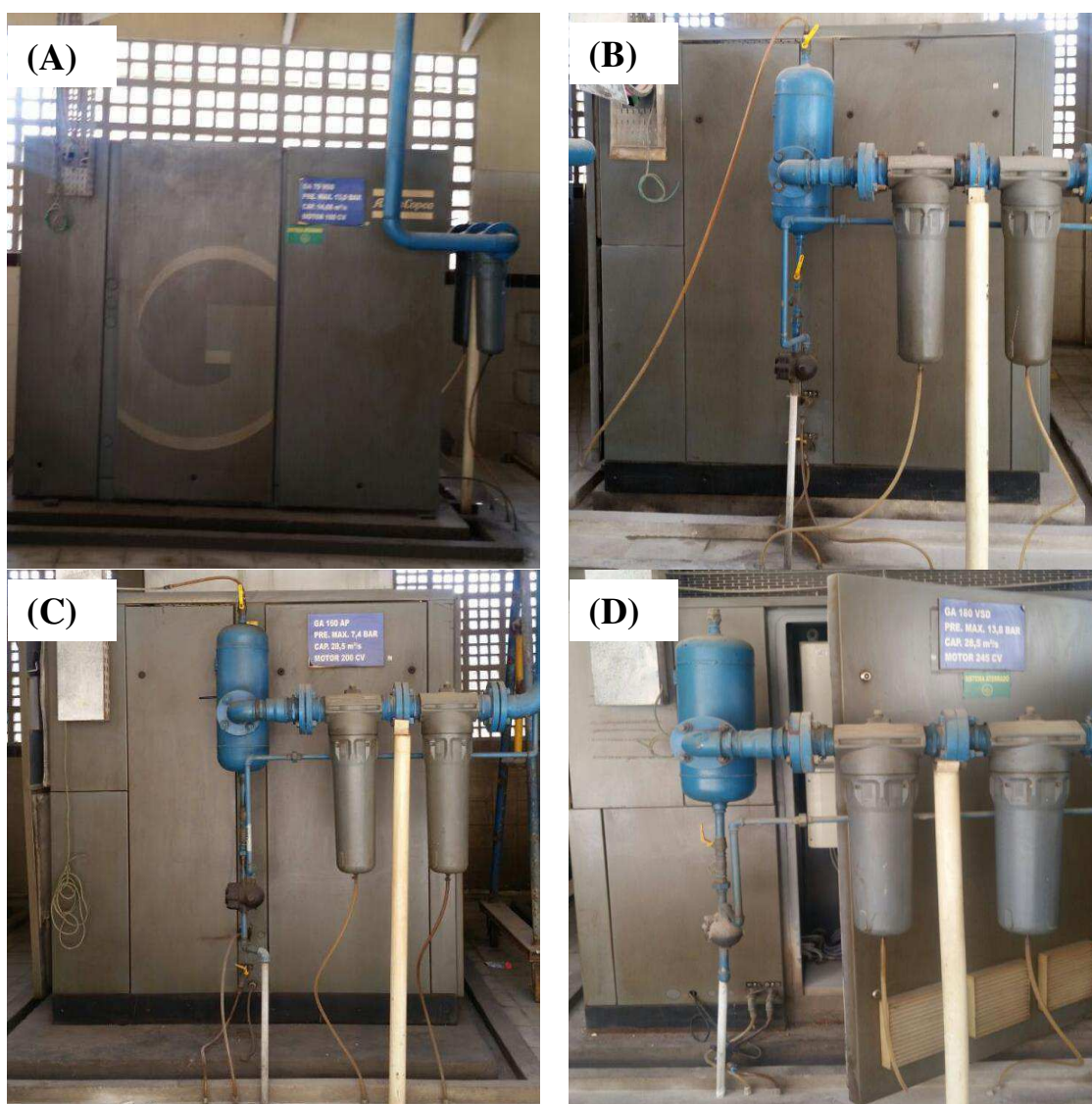
Figura 5. Esboço da disposição dos equipamentos na sala de compressores.

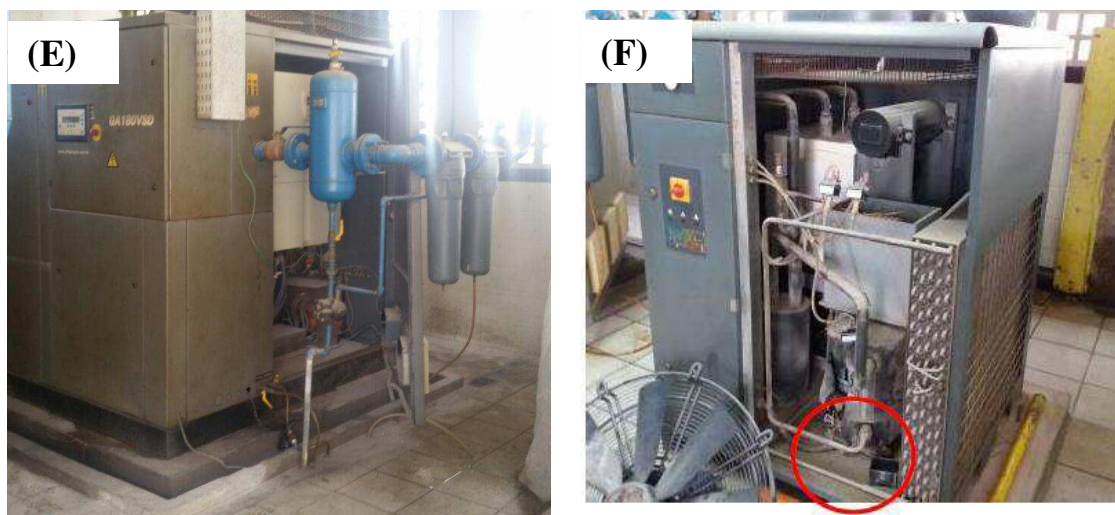


Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 5, SE é a unidade secadora, C1 é o compressor 1, C2 é o compressor 2, e assim sucessivamente. As fotografias dos equipamentos da sala dos compressores são apresentadas na Figura 6.

Figura 6. Fotos da sala de compressores: (A) Compressor 1, (B) Compressor 2, (C) Compressor 3, (D) Compressor 4, (E) Compressor 5, (F) Unidade secadora.





Fonte: Própria, 2018.

As características dos compressores variam entre três tipos distintos, os quais são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Características dos compressores.

Tipo de Compressor	Pressão de trabalho máxima (bar)	Capacidade máxima FAD (l/s)		Potência (kW)	Nível de ruído em dB(A)
		Min.	Máx.		
GA 75 SVD	13	58,3	182	75	69/70
GA 160	7,4	-	475	160	74
GA 180 SVD	13	-	352	180	73

Fonte: Própria, a partir dos dados do fornecedor Atlas Copco, 2018.

Na Tabela 3, 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 Atlas Copco, 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 em 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.

Para a linha de distribuição da Fundição TCI, são utilizados os compressores 2, 3 e 4. Os compressores 2 e 3 são do tipo GA 160, o que significa que eles não possuem a tecnologia SVD, podendo apenas ou funcionar com velocidade fixa para manter a pressão configurada para o seu funcionamento de 6,6 bar, ou entrar em estado de Alívio (*Stand by*).

Para suprir a demanda de ar comprimido da Fundição TCI, apenas um dos compressores do tipo GA 160 e um dos compressores GA 180 SVD são necessários. Neste caso, os compressores 2 e 3 são utilizados de forma alternada, estando sempre um energizado e o outro desenergizado. O compressor GA 180 SVD é utilizado como complementar de demanda, visto que ele possui o sistema de controle modulado, que varia conforme a demanda de ar comprimido do consumidor final.

Já para o sistema de distribuição para a fundição APR e para a Esmaltação, são utilizados os compressores 1 e 5, que são do tipo GA 75 SGD e GA 180 SGD, respectivamente. Neste caso, a pressão de trabalho está configurada para 6,8 bar.

Durante os turnos diurno e vespertino, apenas o compressor 5 é ligado para atender o consumo de ar comprimido. No entanto, como a Esmaltação não trabalha no período noturno, apenas o compressor 1 é ligado neste turno e atende à demanda de ar comprimido da fundição APR. Além disso, a unidade secadora, que atuava na alimentação da linha de distribuição da Fundição APR e Esmaltação, encontra-se fora de funcionamento.

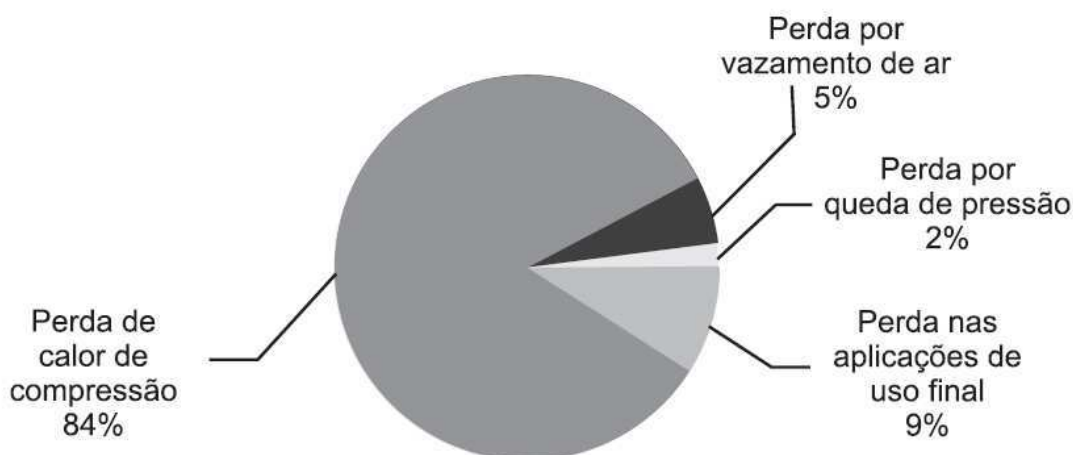
As linhas de distribuição de ar comprimido da fábrica são linhas abertas.

5.2 AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

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 efficientização do sistema.

Na Figura 7, um diagrama de perdas características de sistemas de ar comprimido é apresentado.

Figura 7. Diagrama de perdas características de sistemas de ar comprimido.



Fonte: (ROCHA, 2005).

A partir da Figura 7, pode-se perceber que a principal fonte de perdas de um sistema de ar comprimido é proveniente do calor de compressão, que afeta diretamente a eficiência de compressão do ar, como será visto em 5.2.1.

Na Tabela 4 são mostradas a aplicabilidade (percentual de situações onde esta medida é aplicável), os ganhos (percentual de redução no consumo anual de energia elétrica), e o potencial de contribuições (aplicabilidade x ganho) das oportunidades de melhoria de um sistema de ar comprimido.

Tabela 4. Oportunidades de melhoria da eficiência de um sistema de ar comprimido.

Medidas de economia de energia	Aplicabilidade	Ganhos	Potencial de contribuições
Instalação ou renovação do sistema			
Melhoria dos acionamentos (Motores de alto rendimento)	25%	2%	0,5%
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25%	15%	3,8%
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30%	7%	2,1%
Uso de um sistema de controle sofisticado	20%	12%	2,4%
Recuperação do calor rejeitado para uso em outras funções	20%	20%	4,0%
Melhoria do resfriamento, secagem e filtragem do ar	10%	5%	0,5%

Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50%	9%	4,5%
Redução de perda por queda de pressão	50%	3%	1,5%
Otimização dos dispositivos (equipamentos) de uso final	5%	40%	2%
Manutenção e operação do sistema			
Redução de vazamentos de ar	80%	20%	16%
Substituição de filtros mais frequente	40%	2%	0,8%
Total			32,9%

Fonte: (ROCHA, 2005).

A partir da Tabela 4 pode-se perceber que a oportunidade com maior potencial de contribuições para a eficiência em um sistema de ar comprimido está na redução das fugas de ar, que representa quase metade do potencial total de contribuições.

5.2.1 TEMPERATURA NA SALA DE COMPRESSORES

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 [m³/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).

Na Tabela 5 pode-se verificar o percentual de potência incrementada ou economizada pelos compressores de acordo com a temperatura de admissão do ar, tomando como referência 21°C.

Tabela 5. 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)
4	5,7 (economizado)
10	3,8 (economizado)
16	1,9 (economizado)
21	0
27	1,9 (incrementado)
32	3,8 (incrementado)
38	5,7 (incrementado)
43	7,6 (incrementado)
49	9,5 (incrementado)

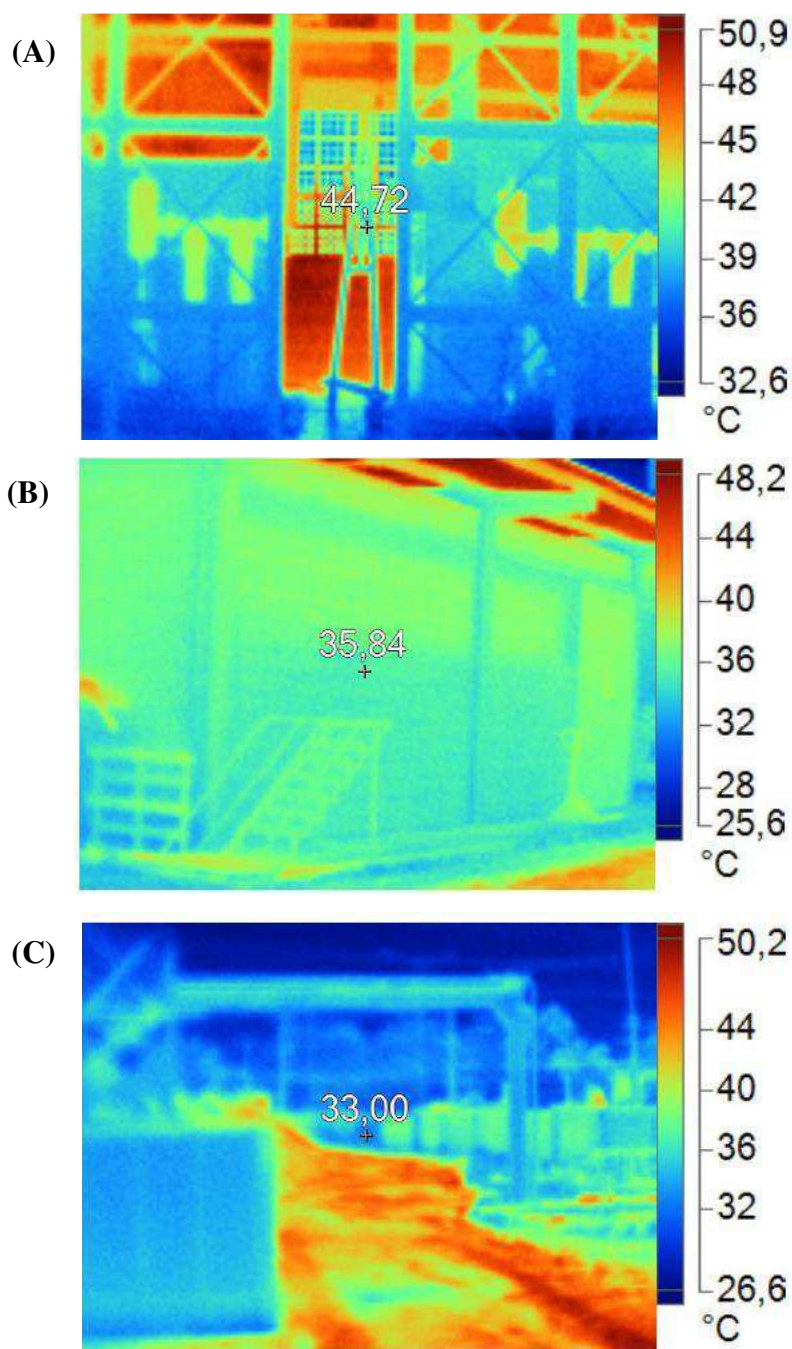
Fonte: (ROCHA, 2005).

4.2.1.1 ESTUDO DE CASO

Nas instalações da fábrica em estudo, no entanto, 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 8 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, obtidas a partir do termovisor Fluke TiR32, a fim de se ter um comparativo entre as temperaturas nos ambientes distintos.

Figura 8. Termografias (A) da sala de compressores, (B) da sala de depósito, (C) do ambiente próximo às salas.



Fonte: Própria, 2018.

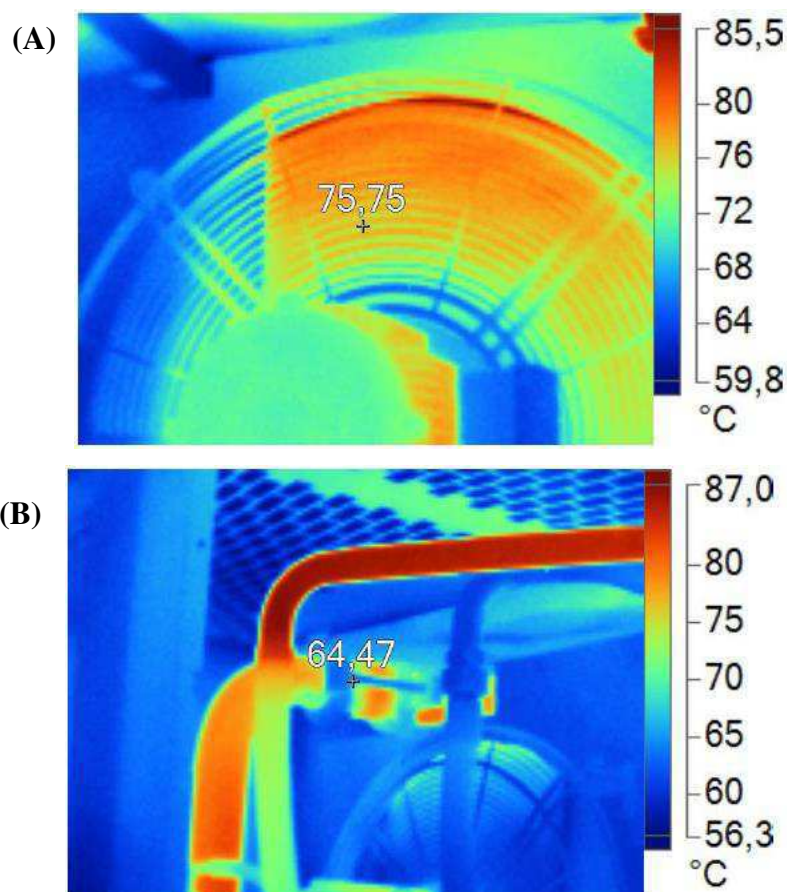
Observando-se a Figura 8, pode-se perceber que a faixa de temperatura da sala de compressores é composta por temperaturas mais elevadas, quando comparada a faixa de temperatura da sala de depósito e do ambiente próximo às salas. Enquanto a temperatura média da sala de compressores foi medida como 41,20°C, a temperatura média da sala ao lado foi 36,36°C, apresentando uma diferença de 4,84°C.

A partir dos dados da Tabela 5, 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 a 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.

Quando os compressores estão em funcionamento, a temperatura em pontos do sistema compressor pode ser extremamente alta, como pode ser observado na Figura 9.

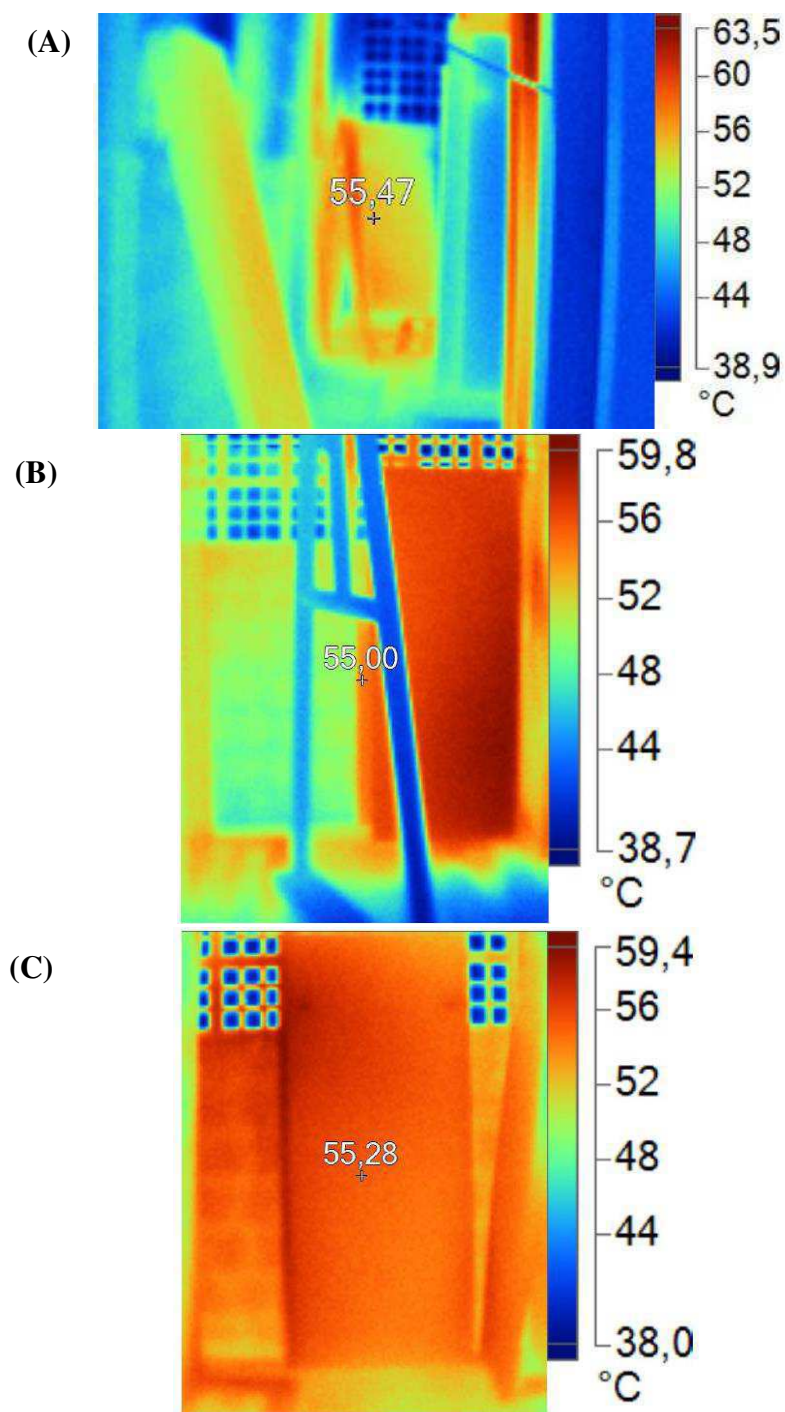
Figura 9. Termografias da parte de trás dos compressores em funcionamento: (A) Compressor 3, (B) Compressor 5.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A alta temperatura dos compressores faz com que o calor seja dissipado para o ambiente da sala através do ar do sistema de exaustão dos compressores, deixando o corredor da parte de trás dos compressores, assim como a estrutura metálica dos equipamentos, sobreaquecidas, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10. Termografias dos corredores (A) da parte de trás dos compressores visto do compressor 2 ao compressor 5; (B) das laterais dos compressores 2 e 3; (C) da lateral do compressor 5 e a parede lateral da sala de compressores.



Fonte: Própria, 2018.

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.

4.2.1.2 OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA

A partir dos dados supracitados, duas propostas de melhorias para a eficiência do sistema compressor de ar foram feitas:

- Conforme recomendado por Barros (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 (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.

5.2.2 RELAÇÃO DE PRESSÃO

Ainda 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 (s/d) 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, portanto, 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.

5.2.3 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. Na Tabela 6, é possível observar a ineficiência associada às fugas nas linhas de ar comprimido.

Tabela 6. Perdas de vazão e potência com vazamentos em sistemas de ar comprimido.

Diâmetro do furo de vazamento (mm)	Escape de ar em mm³/min à pressão de 6 bar	Potência em kW para suprimir a compressão perdida
1	0,006	0,3
3	0,6	3,1
5	1,6	8,3
10	6,3	33,0
15	25,2	132,0

Fonte: (ROCHA, 2005).

As conexões dos sistemas de distribuição de ar comprimido são normalmente feitas por conexões roscadas, flangeadas ou soldadas. A perda gradual de vedação ocorre ao longo dos anos nas conexões rosqueadas e flangeadas, originando pontos de vazamento de ar comprimido, (MONTEIRO; ROCHA, 2005).

Adicionalmente, Rocha (2005) afirma que os tubos de distribuição podem sofrer corrosão e originar vazamentos, sendo recomendável que os tubos corroídos sejam trocados para se aumentar a eficiência energética do sistema.

O autor ainda afirma 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.

Portanto, segundo Rocha (2005), o provável percentual de fugas de ar nas linhas de distribuição com relação ao ar produzido aumenta de acordo com a sua idade e com o seu estado de conservação. Esta faixa de perdas será:

- não superior a 5%, em instalações com até 7 anos e em bom estado de conservação;
- de 5% a 10%, em instalações com idade de até 7 anos e em estado precário de conservação;
- de 10% a 15% em instalações com idade entre 7 a 15 anos e em estado regular de conservação;
- de 15% a 20% em instalações com idade entre 7 e 15 anos e em estado precário de conservação;
- superior a 20% em instalações em estado precário e com idade superior a 15 anos.

Assim, é fundamental se ter uma rota de inspeção das linhas de ar comprimido a fim de se detectar e corrigir as fugas de ar, para se ter um sistema mais eficiente de distribuição e se reduzir o consumo de energia elétrica dos compressores.

4.2.3.1 ESTUDO DE CASO

Os sistemas de distribuição principais de ar comprimido da fábrica em estudo possuem cinco anos, aparentemente em estado precário de conservação. Portanto, de acordo com os dados já vistos, 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 é possível se fazer a estimativa do percentual dos vazamentos das duas linhas de distribuição da fábrica pelo sistema descrito no Anexo A. Além disso, não existe equipamento instalado para medir a potência consumida pelos compressores, dificultando as possíveis estimativas de ganho com a implantação de melhorias.

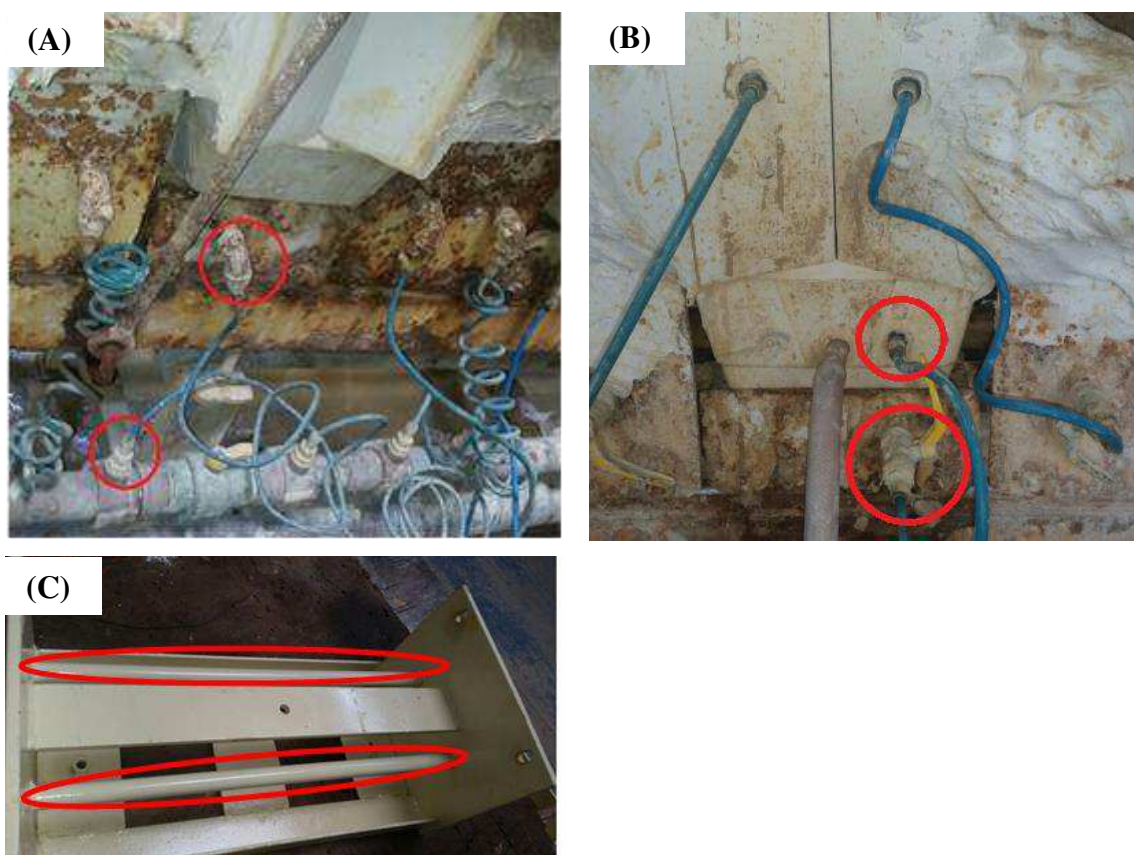
Os pontos de fugas de ar comprimido perceptíveis ocorrem principalmente na fundição TCI, onde se ouve o chiado característico das fugas quando as bancas de fundição são colocadas para espaguetar (processo de retirada de umidade dos moldes de gesso através da injeção de ar comprimido).

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 80 conexões (uma para cada lateral e outra para o pé de cada um dos 28 moldes).

Ainda na parte de trás das bancas, as conexões da linha de distribuição se conectam a joelhos nos carrinhos através de mangueiras de 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.

Na Figura 11 é possível observar os possíveis pontos de vazamento de ar nas bancas de fundição de bacias destacados em vermelho.

Figura 11. Pontos mais prováveis de apresentarem vazamento de ar nas bancas de fundição de bacias.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 11 (A), 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. Já na parte frontal da banca, os pontos de vazamento de ar mais incidentes vistos na

Figura 11 (B), são as válvulas esfera, quando desgastadas, os conectores dos moldes, e até mesmo as mangueiras, quando trincadas ou rachadas.

Como pode ser identificado na Figura 11(C), na parte inferior dos carrinhos, os pontos prováveis de vazamento de ar são os tubos galvanizados, os quais podem estar bastante danificados em detrimento do estado de conservação da banca.

A falta de equipamentos de medição, no entanto, não permite que os percentuais de perda neste setor sejam medidos. No entanto, tais fugas precisam ser amenizadas.

4.2.3.2 OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA

As oportunidades de eficiência energética com a eliminação de fugas de ar comprimido são:

- 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, como pode ser vista na Figura 12.

Figura 12. Modificação proposta para a redução de pontos de vazamento de ar nas bancas de fundição de bacias.



Fonte: A autoria própria, 2018.

- Implantação da manutenção autônoma nos setores que utilizam o ar comprimido a fim de se eliminar os pontos perceptíveis de vazamento logo que surgirem. Apesar de já estar estruturada na fundição, a manutenção autônoma ainda não foi colocada em prática no setor;
- 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;
- 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, conforme o procedimento indicado no Anexo A.

5.2.4 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.

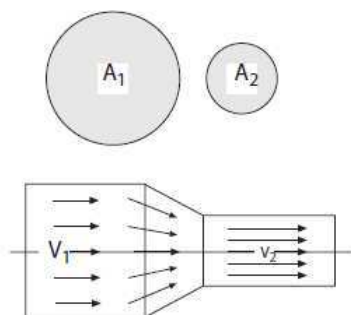
O autor informa também que as perdas de carga são proporcionais ao quadrado da velocidade. De acordo com a hidrodinâmica do ar comprimido, a vazão de ar (Q) em um tubo circular é igual ao produto da área de passagem (A) com a velocidade do ar (v).

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:

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

Na Figura 13 o comportamento do fluxo de ar em tubos circulares é ilustrado.

Figura 13. Comportamento do fluxo de ar em tubos circulares.



Fonte: (ROCHA; 2005)

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.

4.2.4.1 ESTUDO DE CASO

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.

4.2.4.2 OPORTUNIDADES DE EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA

Para se amenizar as perdas de carga dos sistemas de alimentação da fábrica, as seguintes proposições serão apresentadas:

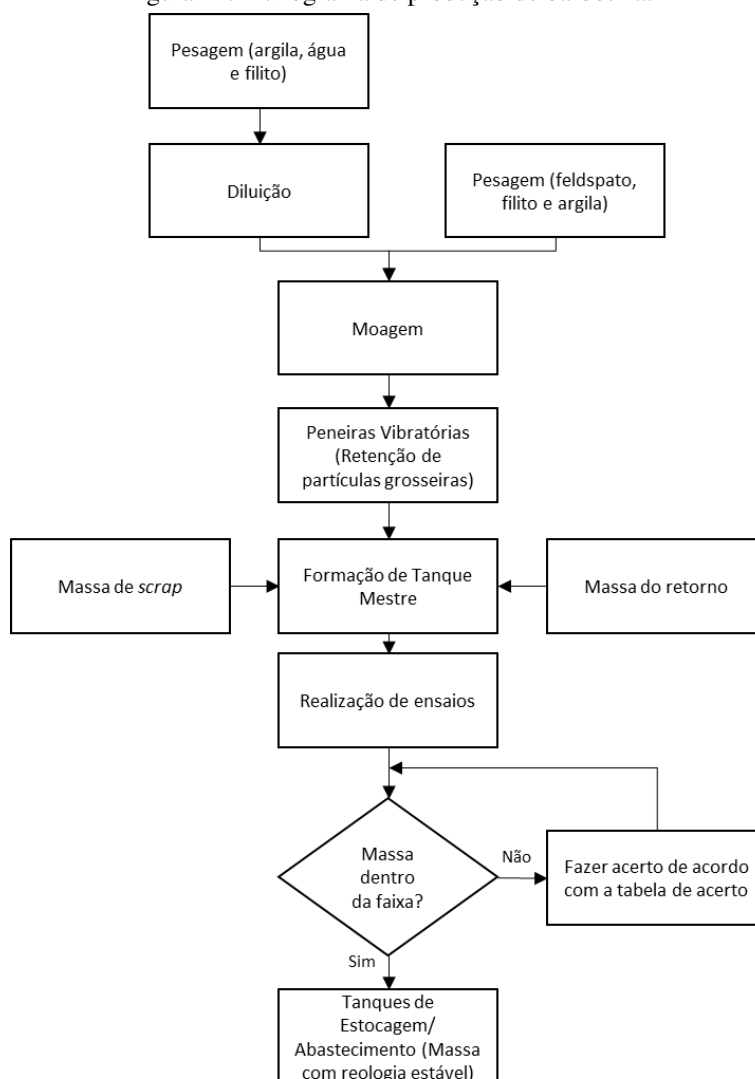
- Mapeamento dos sistemas de distribuição;
- Eliminação dos pontos do sistema de distribuição que estiverem desativados;
- Estudo de viabilidade da modificação da distribuição secundária na fundição TCI, de forma que a tubulação secundária tenha maior seção transversal, reduzindo estes diâmetros apenas nos pontos onde esta redução for realmente necessária.

6 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.

O fluxograma de produção de massa pode ser visto na Figura 14.

Figura 14. Fluxograma de produção de barbotina.



Fonte: Autoria própria, 2018.

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 será, portanto, na otimização da operação dos moinhos.

6.1 MOINHOS DE BOLAS

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.

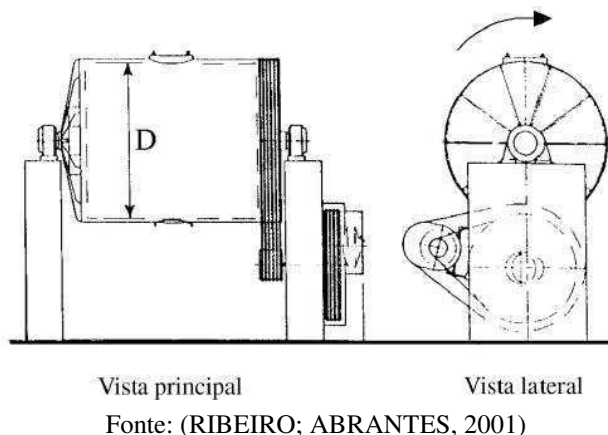
As características das matérias primas que influenciam no rendimento da moagem são (RIBEIRO; ABRANTES, 2001):

- Dimensões e formas iniciais das partículas;
- Dureza do material;
- Estrutura homogênea ou heterogênea;
- Umidade;
- Sensibilidade a variações de temperatura;
- Tendência à aglomeração.

A utilização de moinhos *Alsing* 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.

A estrutura dos moinhos de bolas pode ser vista na Figura 15.

Figura 15. Moinho de bolas descontínuo.



Vista principal

Vista lateral

Fonte: (RIBEIRO; ABRANTES, 2001)

A partir da Figura 15, pode-se constatar que os moinhos *Alsing* são compostos por um cilindro oco, de diâmetro interno D , metálico, que rotaciona 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).

Nos moinhos de bolas 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).

6.2 MOINHOS DE BOLAS DA UNIDADE EM ESTUDO

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 angular nominal de 1160 rpm.

6.2.1 AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

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, como o processo de cominuição 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.

6.2.1.1 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.

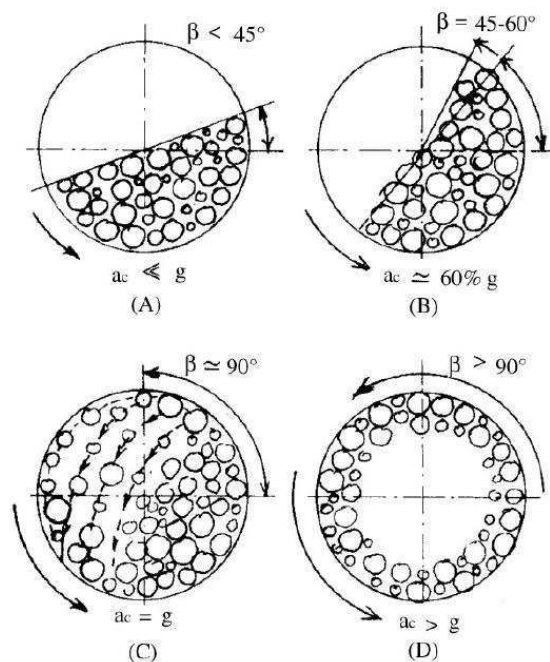
A velocidade crítica, por sua vez, é a velocidade à qual a ação da moagem é nula, pois o peso dos corpos moedores iguala-se à força centrífuga. A velocidade crítica pode ser encontrada a partir de (3).

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

em que D é o diâmetro interno do moinho, (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

Na Figura 16 pode-se verificar a ilustração esquemática no interior de um moinho de bolas para quatro valores diferentes de aceleração centrípeta (a_c) com relação à aceleração da gravidade (g).

Figura 16. Ilustração esquemática de quatro diferentes situações no interior de um moinho.



Fonte: (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

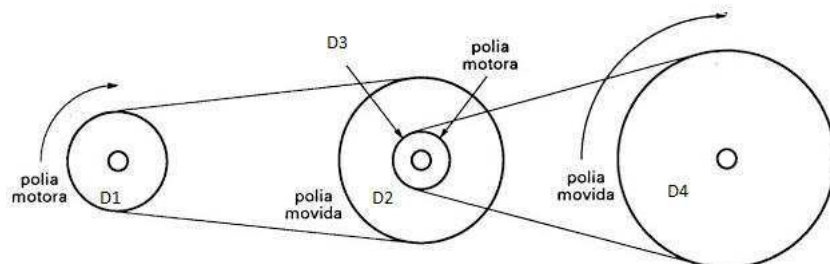
Na Figura 16, o ângulo de cascata (β) é o ângulo formado entre o plano das bolas inclinadas e a horizontal. Em (A), o baixo grau de moagem está relacionado à aceleração centrípeta ser muito inferior à aceleração da gravidade, o que resulta em um ângulo de cascata menor que 45° . Um bom grau de moagem é atingido em (B), 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. Em (C) e em (D), a moagem é nula, sendo $\beta=90^\circ$ a situação em que o moinho atinge a velocidade crítica, (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

6.2.1.1.1 ESTUDO DE CASO

Para os moinhos em estudo, dado o diâmetro interno, 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).

A partir da Figura 17 pode-se observar um esquema do sistema de acoplamento de polias similar ao sistema de acoplamento entre os motores e os moinhos da Fábrica de Massa da fábrica de louças em estudo.

Figura 17. Esquema de sistema acoplamento genérico, similar ao utilizado entre os motores e os moinhos da fábrica de louças em estudo.



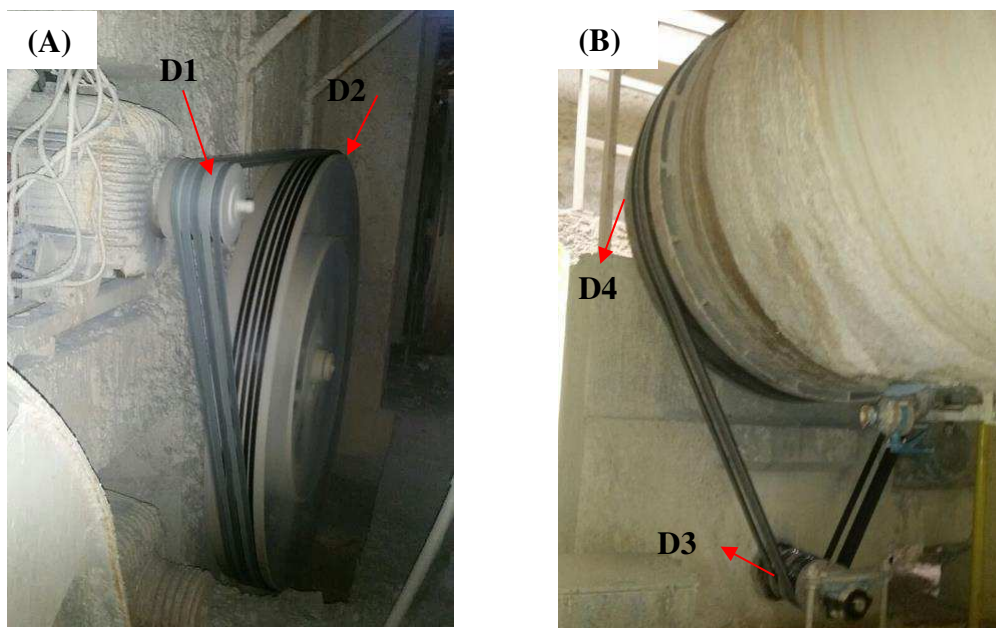
Fonte: Adaptada de < ng-cleitonchaves.blogspot.com.br >, acesso em 02 de março de 2018.

Analogamente ao esquema de acoplamento de polias da Figura 17, o sistema de acoplamento dos moinhos da planta possui o eixo do motor acoplado a uma primeira polia, polia motora D1. A segunda polia, polia movida D2 está conectada à D1 através de uma correia e, portanto, ambas possuem a mesma velocidade tangencial.

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

As fotografias das polias no sistema de acoplamento motor-moinho da unidade fabril de louças em estudo podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18. Fofos do sistema de acoplamento motor-moinho da fábrica de louças em estudo, (A) Polias D1 e D2 e (B) polias D3 e D4.



Fonte: Autoria própria, 2018.

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 para este sistema de acoplamento pela seguinte expressão:

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

em que ω_{motor} , ω_{moinho} , ω_{D2} e ω_{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.

6.2.1.1.2 OPORTUNIDADES DE OTIMIZAÇÃO

Para a redução do tempo de moagem a partir da otimização da velocidade real de rotação do moinho, a proposta inicial foi de se reduzir o diâmetro das polias D2 ou D4, ou de se aumentar o diâmetro das polias D1 ou D3, a fim de se compensar os problemas de escorregamento do sistema de polias e de se aproximar a velocidade de rotação real à velocidade de rotação ótima.

Para fins de experimentação, como a polia D1 de um dos moinhos estava danificada, fez-se a alteração no projeto da peça para que o seu novo diâmetro fosse incrementado em 150 centímetros, 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 8h, 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 1h.

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.

6.2.1.2 QUANTIDADE ÓTIMA 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 (4), pode-se calcular a quantidade ótima de bolas para se usar em um moinho.

$$P = V \times d_B \times p \times 0,60; \quad (4)$$

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

6.2.1.2.1 ESTUDO DE CASO

Tendo em vista o volume útil dos moinhos da planta, o peso específico das bolas de alta alumina e a taxa de ocupação aparente das bolas, a partir de (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%).

6.2.1.2.2 OPORTUNIDADES DE OTIMIZAÇÃO

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 cominuição.

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

6.2.1.3 REVESTIMENTO INTERNO DOS MOINHOS

Para evitar que a energia cinética dos corpos moedores seja perdida em colisões plásticas com o revestimento de borracha e de se aumentar o efeito da moagem pela compressão e o atrito do material processado com o revestimento do moinho, realizou-se teste com revestimento duro em um dos moinhos.

6.2.1.3.1 ESTUDO DE CASO

O revestimento de maior dureza 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 8h, enquanto o moinho com revestimento de maior dureza o realiza em 7h.

A redução de 1h 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.

6.2.1.3.2 OPORTUNIDADES DE OTIMIZAÇÃO

Na Tabela 7 os dados de custo do revestimento e da mão de obra para a troca do revestimento, do tempo total requerido no processo de cominuição e o tempo de vida útil do revestimento de maior dureza são dados com relação ao revestimento de borracha.

Tabela 7. Tabela do comparativo entre o revestimento de maior dureza e o revestimento de borracha em termos percentuais para os moinhos de bola da fábrica de massa.

Revestimento	Custo do revestimento e da mão de obra	Horas/ moagem	Tempo de vida útil
Revestimento de alta dureza com relação ao revestimento de borracha	138,55%	87,5%	De 200% a 500%

Fonte: Autoria própria, 2018.

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 irá ser reduzido em cerca de 17,8 MWh 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.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso, melhorias na área de eficiência energética, com foco em energia elétrica, para uma indústria de louças sanitárias, foram propostas com a finalidade de reduzir custos de produção para alavancar a competitividade da empresa.

O diagnóstico energético foi realizado, com ênfase nos dois setores com maiores oportunidades de efficientização: o sistema de ar comprimido e a fábrica de massa. Para cada um dos setores analisados, identificaram-se pontos críticos e foram propostas medidas corretivas e de otimização para a melhoria da eficiência energética.

As medidas de efficientização propostas tiveram como base uma revisão bibliográfica sobre cada problema, com dados provenientes de livros, manuais e guias de eficiência energética, além de artigos sobre os processos cerâmicos.

A auditoria energética ajudou a identificar a necessidade do monitoramento do consumo energético dos setores da fábrica, além da aquisição de equipamentos para a medição do caudal das linhas de distribuição de ar comprimido, para a definição do valor do metro cúbico de ar comprimido gerado.

As propostas de efficientização energética feitas neste trabalho servirão como base para a determinação de um plano de ação de um projeto de redução de custos de produção para o ganho de competitividade da fábrica.

REFERÊNCIAS

- MME – Ministério de Minas e Energia. (2007). Plano Nacional de Energia 2030. Brasília: MME: EPE. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/PNE>>. Acesso em 28 de agosto de 2017.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2017). *Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em 28 de agosto de 2017
- OLIVEIRA, R. G. (2015). *Energia como Função de Estado no Contexto da Eficiência Energética*. Trabalho de Conclusão de Curso, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- Eletrobrás *et al.* *Energia elétrica: conceito, qualidade e tarifação: guia básico*. Brasília: IEL/NC, 2008.
- ESTEVEZ, E. F.; MOURA, L. S. Avaliação de Desperdícios e Perdas de Matéria-Prima no Processo Produtivo de uma Fábrica de Bebidas. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Resende, VII, n. 7, 2010.
- INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. (2001). *Eficiência Energética e o Novo Modelo do Setor Energético*. Rio de Janeiro: INEE, 2001.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Eficiência Energética na Indústria e nas Residências*. Rio de Janeiro, RJ – Brasil: EPE, 2010.
- VIANA, A. N. *et al.* (2012). *Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações* (1 ed.). Campinas, São Paulo, Brasil: Fupai.
- THUMANN, A. (2007). *Handbook of energy audits* (7 ed.). Lilburn: The Fairmont Press.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Guia prático: conceitos e ferramentas de gestão e auditoria energéticas*. Brasília: MMA, 2015. 80 p. ISBN 978-85-7738-251-4.
- SOUZA FILHO, J. E. (2001). *Eficiência Energética Relacionada com a Redução de Perdas e com a Qualidade de Energia Elétrica*. Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 2001.
- Adene – Empresa para Energia. (s/d). Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido.
- ROCHA, N. R. *Eficiência energética em sistemas de ar comprimido*. Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005. 208 p. (Livro Técnico).
- MONTEIRO, M. A. G.; ROCHA, C. A. *Eficiência energética em sistemas de ar comprimido*. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel, 2005. 87 p. (Manual Prático).
- SANTOS, A. H. *et al.* (2007). *Eficiência Energética: Teoria e Prática* (1 ed.). Itajubá, MG: Fupai. 2007. 224p.

BARROS, B. F., BORELLI, R., GEDRA, R. L. *Eficiência Energética: Técnicas de Aproveitamento, Gestão de Recursos e Fundamentos*. São Paulo: Érica. 2015. 152 p.

RIBEIRO, M. J. P. M., ABRANTES, J. C. C. Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. *Cerâmica Industrial*. Portugal, v. 6, n. 3, março/abril. 2001. Bimestral. Disponível em: <www.ceramicaindustrial.org.br>. Acesso em: 25 fev. 2018.

TAVARES, L. M. *Um Novo Método para o Cálculo da Eficiência Energética de Moinhos Industriais*. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10093/>>. Acesso em 03 de março de 2018.

ANEXO A – MÉTODO PRÁTICO PARA QUANTIFICAR OS VAZAMENTOS DE UMA INSTALAÇÃO¹

Será descrito a seguir um procedimento que revelará o quanto está se perdendo de ar por vazamento.

Pré-requisitos

- A instalação consumidora de ar comprimido deverá estar fora de operação (os equipamentos consumidores devem estar ligados normalmente à rede, porém inoperantes).
- Caso na instalação exista mais de um compressor para alimentar a rede, dá-se preferência ao de menor porte. Todas as características do compressor devem ser conhecidas, principalmente a vazão que pode produzir.
- O manômetro instalado na rede ou no reservatório deverá estar funcionando perfeitamente e, se possível, calibrado.
- São necessários dois cronômetros.
- Utilizar os mesmos níveis de pressão que estiverem ajustados no pressostato de controle e certificar-se de que esteja funcionando perfeitamente.

Procedimento de teste

- Ligar, manualmente, o compressor que será usado no teste, colocando-o em carga até que a pressão da rede atinja o valor de desarme.
- Quando ocorrer o desarme (alívio), acionar o primeiro cronômetro, deixando-o funcionar durante todo o teste.

¹ Método prático para quantificar os vazamentos de uma instalação (MONTEIRO; ROCHA, 2005, p 140-142).

- Assim que a pressão da linha cair e o compressor religar e entrar em regime de compressão, acionar o outro cronômetro, o qual deverá ser parado logo que novamente for atingida a pressão de desligamento.
- Esta rotina deverá ser repetida pelo menos 5 vezes, para se obter maior precisão dos resultados.
- Ao final da última repetição do teste, ambos os cronômetros devem ser desligados.

Durante o teste, o volume de ar deslocado ao longo do tempo de compressão efetiva é aproximadamente equivalente ao ar que atravessa os orifícios de vazamento durante a somatória dos tempos de compressão e alívio do compressor (é como se os vazamentos fossem um consumidor virtual).

Portanto, o volume de ar vazado multiplicado pela soma do tempo de alívio e o de compressão deve ser igual ao volume de ar comprimido durante os tempos de compressão.

$$Q_{vaz} \times T = Q_{comp} \times t, \quad (5)$$

$$Q_{vaz} = (Q_{comp} \times t)/T,$$

em que:

Q_{vaz} = vazão atribuída aos vazamentos (m³/min);

T = tempo total (alívio + compressão) registrado no primeiro cronômetro (min);

Q_{comp} = capacidade nominal do compressor usado no teste (m³/min);

t = tempo do compressor em carga (compressão) registrado pelo segundo cronômetro.

O valor obtido para Q_{vaz} é a vazão atribuída aos vazamentos existentes, que poderá ser comparada com a capacidade de todos os compressores do sistema que operem em simultaneidade alimentando a mesma rede de ar sob análise, de forma que se possa quantificar o percentual global das perdas por vazamento (% perdas = $Q_{vaz}/Q_{global} \times 100$),

Q_{global} é a vazão produzida por todos os compressores que funcionam com simultaneidade no sistema.

Esse mesmo percentual poderá ser aplicado para o cálculo da energia elétrica perdida em kWh pelos motores elétricos. Calculados os consumos dos motores por

medições reais e aplicando-se esse percentual à energia consumida, tem-se o valor da energia perdida pelos vazamentos.