



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/08
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO -XIV

**GRUPO DE ESTUDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA
EDUCAÇÃO - GET**

**IMPLANTAÇÃO DE PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS:
BENEFÍCIOS ENERGÉTICOS, EMPRESARIAIS E AMBIENTAIS**

**Carlos Aparecido Ferreira(*)
ELETROBRAS**

**Carlos Henrique Moya
ELETROBRAS**

**Roberto Ricardo Góes
ELETROBRAS**

**Samuel Moreira Duarte Santos
ELETROBRAS**

**Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira
ELETROBRAS**

**Braulio Romano Motta
ELETROBRAS**

**Fernando Pinto Dias Perrone
ELETROBRAS**

**Luís Felipe Gomes
CEFET-RJ**

**Edson Szyszka
CEPEL**

**Alexandre Hastenreiter Assumpção
ELETROBRAS**

**Hailton Vasconcelos
ELETROBRAS AMAZONAS ENERGIA**

**Simone Ribeiro Matos
ELETROBRAS**

**Gabriel Pereira Rabha
Eletrobras**

RESUMO

Neste Informe Técnico apresentam-se os resultados dos diagnósticos energéticos em sistemas de ar comprimido das indústrias do Polo Industrial de Manaus (PIM). Foi utilizada análise sistêmica e avaliadas diversas possibilidades de intervenção, que resultaram em baixo tempo de retorno dos investimentos das ações propostas e que implicaram em implementação imediata da maioria das ações propostas. Além da diminuição do consumo de energia elétrica na área de atuação da Amazonas Energia, reduz-se, ainda, o consumo de óleo diesel, óleo combustível e de gás natural utilizados para geração de energia em Manaus. Um dos pontos considerados na seleção das indústrias é que fossem potencialmente consumidores livres, após a interligação do sistema elétrico de Manaus ao SIN.

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência Energética, Sistemas Motrizes, Ar Comprimido

1.0 - INTRODUÇÃO

O setor industrial é responsável por 38% do consumo de energia elétrica no Brasil [1], ver Figura 1. Sabe-se ainda, que o consumo de energia nos sistemas motrizes corresponde a 62% (ou 68% considerando refrigeração) do total de energia elétrica consumida na indústria [2], ver Figura 2. Sendo assim, sistemas motrizes industriais são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 25% da energia elétrica consumida no Brasil.

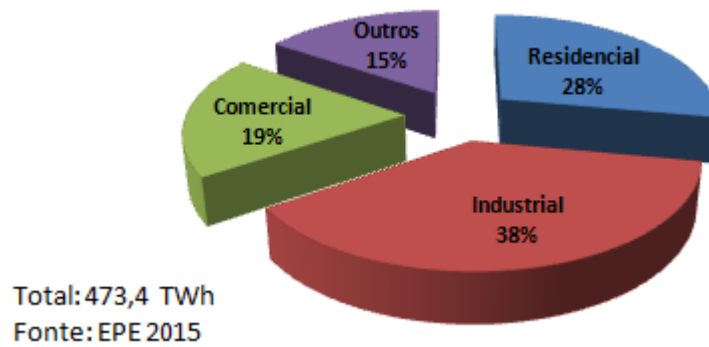


FIGURA 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil

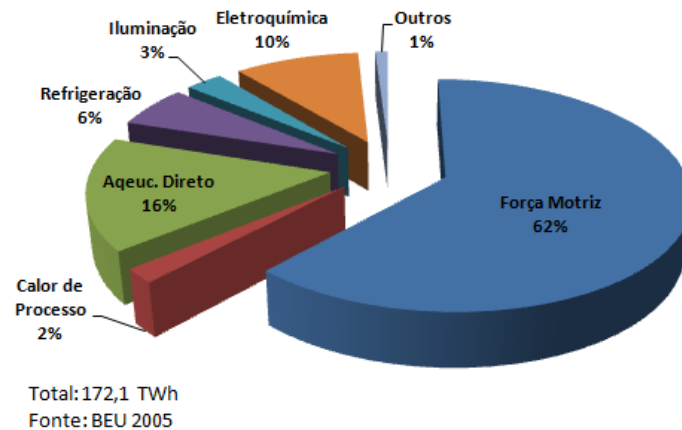


FIGURA 2 – Consumo de energia elétrica no setor industrial brasileiro

Em relação ao estado do Amazonas, a Amazonas Energia é responsável pela geração, transmissão, distribuição e comercialização de toda a energia do Estado. Para o percentual de consumo dos principais setores referentes ao ano de 2012 estão indicados na Figura 3.

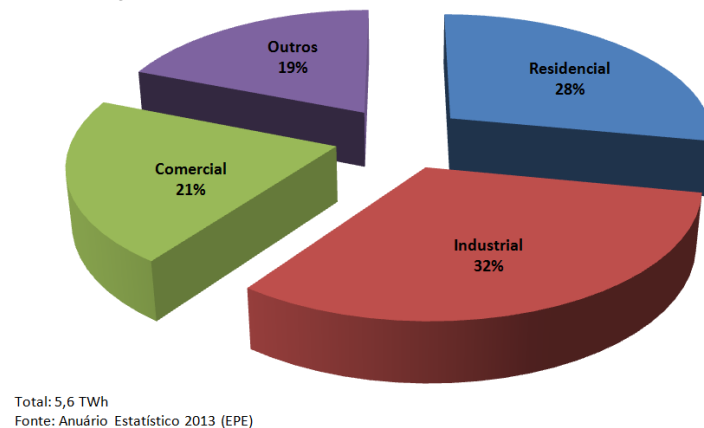


FIGURA 3 – Consumo de energia elétrica por setor no estado do Amazonas em 2012

Nota-se que o setor industrial é o responsável pelo maior consumo de energia elétrica do Estado (32%), fato que justifica o foco de atuação de projetos de eficiência energética nesse segmento, especificamente no PIM, dada a sua representatividade no Amazonas.

O elevado consumo de energia elétrica em sistemas motrizes industriais motivou a Eletrobras a atuar no combate ao desperdício de energia elétrica nesse uso final por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Cabe destacar que, além do elevado consumo de eletricidade, os sistemas motrizes também são o uso final da energia elétrica com maior potencial de eficiência energética, segundo estudo realizado pela Eletrobras e CNI [3]. Dentre os diversos sistemas motrizes acionados por eletricidade, os sistemas de ar comprimido apresentam o maior potencial técnico e econômico de eficiência energética no setor industrial.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 Sistemas Motrizes

Desde a década de 80 vários diagnósticos energéticos vêm sendo realizados supondo que o motor elétrico é o principal consumidor de energia nas indústrias. Nestes trabalhos apresenta-se como principal recomendação a substituição deste equipamento, acompanhada por outras ações como análises da iluminação (baixo consumo e potencial), fator de potência (com o objetivo de se evitar multas) e tarifação (redução de custo). As recomendações apresentadas segundo esta concepção apresentam altos tempos de retorno dos investimentos (superiores a 5 anos), em muitos casos, acarretando na não implementação das ações recomendadas.

Considerando-se que o motor elétrico só consome suas perdas e que apresenta elevada eficiência (se adequadamente dimensionado, especificado e operado), o maior potencial de eficiência energética é obtido a partir da ponta de seu eixo, considerando que a maior parte da energia elétrica é convertida para energia mecânica. Nesse sentido, os sistemas motrizes devem ser analisados como um todo (incluindo o motor elétrico), conforme indicado na Figura 4. Além da avaliação sistêmica, não somente a troca de equipamentos deve ser abordada, mas, também, aspectos relacionados à instalação, operação, manutenção etc. Dessa maneira, consegue-se propor ações com menor tempo de retorno de investimento, o que estimula a implementação. As ações recomendadas nos diagnósticos energéticos realizados no PIM apresentam essa quebra de paradigma com relação à visão tradicional, tanto no que diz respeito à visão sistêmica, quanto aos tipos de intervenção recomendada (não somente troca de equipamentos). Esta abordagem está de acordo com práticas internacionais recomendadas pela UNIDO (*United Nations Industrial Development Organization*), VIII EEMODS (*Energy Efficiency in Motor Driven Systems*) e pela norma internacional de gestão energética ISO 50.001.



FIGURA 4 – Visão Sistêmica (Sistemas Motrizes)

NOTA: Em azul, os componentes do sistema motriz segundo visão tradicional de diagnósticos energéticos nas indústrias

2.2 Sistemas de ar comprimido

Sistemas de ar comprimido são muito utilizados na indústria. Todavia, a falta de um projeto adequado e de manutenção regular provoca a redução no desempenho global deste sistema, caracterizando-se desta forma como uma fonte constante de desperdícios.

Uma pesquisa do início deste século nos países da Comunidade Europeia mostrou que o potencial de redução das perdas em sistemas de ar comprimido são da ordem de 30% a 50% [5].

Sob o ponto de vista físico, existem três tipos de trabalho por unidade de massa, requerido pelo compressor para comprimir o ar, a saber: isotérmico, politrópico e isentrópico. Devido à alta rotação dos compressores modernos, as trocas de calor existentes entre motor, compressor e sistema de lubrificação, fazem com que o processo de compressão aproxime-se do isentrópico, mesmo nos compressores bem arrefecidos [6]. A equação (1) apresenta o trabalho por unidade de massa, considerando o ciclo isentrópico [7].

$$W_{isentrópico} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_0 \cdot n \cdot \left[\left(\sqrt[n]{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

Nessa equação, k é a relação entre os calores específicos à pressão e a volume constante¹, R é a constante universal dos gases (288 J/kgK), T_0 é a temperatura do ar de admissão, n é o número de estágios do compressor e r_p é a relação de compressão.

A potência hidráulica no fluido (P_f) é dada pela equação (2) [7]:

$$P_f = w_{isentrópico} \cdot \dot{m}_s \quad (2)$$

Onde \dot{m}_s é a vazão mássica comprimida, normalizada em relação às condições termodinâmicas de entrada.

De (1), verifica-se que a otimização da geração do ar comprimido está relacionada basicamente a três ações: redução do percentual de vazamento, redução da temperatura do ar de admissão, adequação (redução na maioria das situações) da pressão de operação, conforme será destacado a seguir.

2.3 Influência da vazão de operação na potência

Analisando a equação (2) constata-se que o consumo de energia dos compressores é diretamente proporcional à vazão de ar comprimido, o que torna imperativa a minimização dessas perdas. Mesmo as novas instalações podem apresentar vazamentos ao longo do seu funcionamento em menor ou maior escala [7]. A experiência da Eletrobras indica que percentuais acima de 70% de desperdícios não são incomuns.

Existem alguns métodos para quantificar os vazamentos de ar comprimido, destacando-se: medição por diferencial de pressão do reservatório, medição do tempo em carga e pelo método do *base load*, que foi o adotado para este trabalho. A justificativa para esta escolha está na possibilidade de setorizar as principais perdas.

Para empregar o método do *base load* é necessário monitorar e registrar os dados de potência elétrica dos compressores e retirar de operação sequencialmente os principais consumidores de ar comprimido. Desta forma, pode-se por diferença, obter a potência necessária para alimentar os vazamentos dos diversos equipamentos.

Este método está exemplificado na Figura 5.

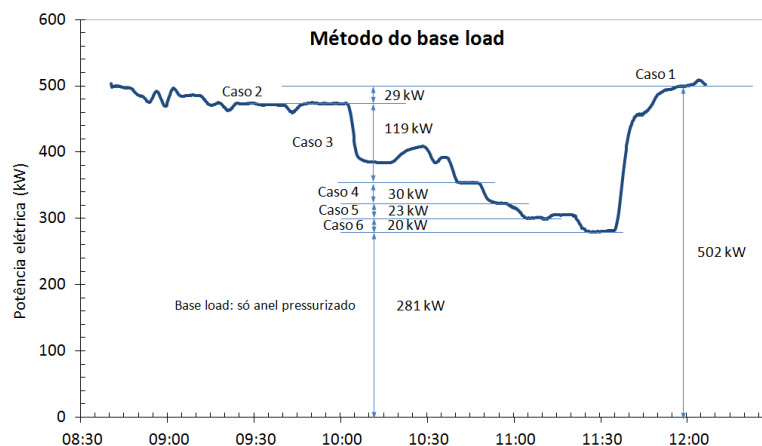


FIGURA 5 - Método do *base load*

O caso 1 corresponde a planta operando com 100% da capacidade e no caso 2 todas as máquinas estão em *stand by*. Os demais casos referem-se a retirada sucessiva de operação dos principais consumidores de ar e o *base load* indica a energia necessária para alimentar os vazamentos do anel. Esta metodologia possibilitou identificar as principais perdas, as quais estão indicadas na Figura 6.

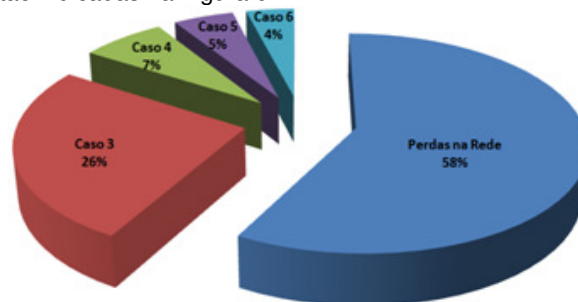


FIGURA 6 - Identificação das principais perdas por vazamentos

¹ Para o ar atmosférico esta relação varia pouco e assume normalmente valor de 1,41.

2.4 Redução da temperatura de admissão

Pelas equações (1) e (2) pode-se afirmar que a temperatura de admissão também é diretamente proporcional à potência hidráulica do fluido e, consequentemente, também o é em relação à potência elétrica de entrada do motor elétrico.

Assim, a equação (3) apresenta o percentual de aumento de potência (ΔP_f), para dada condição de trabalho, a partir do aumento da temperatura de admissão ótima (T_1) para uma temperatura de admissão (T'_1) maior que T_1 [7].

$$\Delta P_{f-temperatura} = \left(1 - \frac{T'_1}{T_1}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

De (3) observa-se que a diminuição da temperatura do ar de sucção é responsável por uma redução proporcional na potência hidráulica do fluido e, consequentemente, na potência elétrica de alimentação do motor do compressor.

2.5 Adequação da pressão de trabalho na potência

A pressão de trabalho tem influência direta na relação de compressão e, consequentemente, no trabalho por unidade de massa. De (1) observa-se que esta relação é exponencial. A equação (4) mostra o percentual de perdas devido à pressão elevada, onde r_p é a relação de compressão original e r'_p a relação de compressão pós otimização [7].

$$P_{\%} = \left[1 - \frac{\left(\sqrt[n]{r'_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left(\sqrt[n]{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right] \cdot 100 \quad (4)$$

2.6 Metodologia

As atividades iniciaram-se com a apresentação de um plano de trabalho para implantação do Programa de Eficiência Energética no Polo Industrial de Manaus para a Diretoria de Distribuição da Eletrobras e posteriormente para a CIEAM e a Suframa, para a divulgação junto às indústrias do Polo.

Foram selecionadas quatro indústrias dos setores metalmecânico, eletroeletrônico e plásticos, que possuem expressiva utilização de ar comprimido em seus processos produtivos. Um dos pontos considerados na seleção é que fossem consumidores potencialmente livres a partir da interligação do sistema elétrico de Manaus ao SIN, buscando-se uma futura fidelização dessas empresas junto à Amazonas Energia.

O Programa desconsiderou nesta etapa plantas que apresentaram oportunidades de economia de energia em outros sistemas motrizes, que possuíam equipamentos que utilizam sistemas de ar comprimido dedicados ou que estavam em fase de modernização das linhas de produção.

Após a seleção das indústrias participantes foram realizadas diversas reuniões de planejamento das atividades que seriam executadas em campo, onde definiu-se tanto as questões administrativas, que envolveram a logística, a saúde ocupacional da equipe, o levantamento dos equipamentos de medição necessários, dentre outros, quanto técnicas, onde foram identificados os perfis energéticos das plantas com as respectivas faturas de energia elétrica, os modelos dos compressores e motores com as curvas características, dentre outros). Esse levantamento técnico preliminar foi essencial para reduzir o tempo de realização dos diagnósticos energéticos e consequentemente, os custos envolvidos.

Os trabalhos de campo tiveram início com a realização dos diagnósticos energéticos nas instalações das empresas entre os dias 28 de agosto e 5 de setembro de 2013. As medições realizadas incluíram tanto as grandezas elétricas quanto as mecânicas, conforme indicado na Figura 7. As informações necessárias à análise foram complementadas por entrevistas com as equipes de engenharia, operação e manutenção de cada planta.

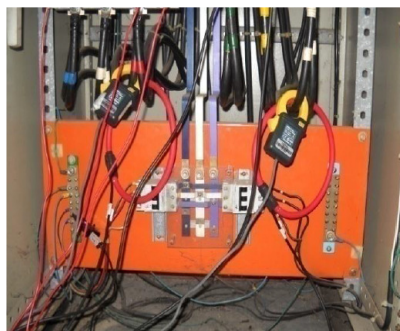


FIGURA 7 - (a)



FIGURA 7 - (b)



FIGURA 7 - (c)



FIGURA 7 - (d)

NOTA: Medições realizadas (a), consumo de energia dos compressores (b), Pressão na descarga do compressor (c), Temperatura do ar de sucção (atmosférica) (d) Velocidade do ar na sucção².

O trabalho posterior ao realizado em campo consistiu na interpretação e análise dos dados obtidos junto às plantas e os medidos pela equipe da Eletrobras e Cepel. Finalizada esta fase foi elaborado um relatório técnico, para cada indústria, no qual foram apresentadas as análises técnicas e econômicas da geração e uso de ar comprimido.

No dia 13/03/2014 foi realizado em Manaus, na sede da FIEAM, um *workshop* para apresentação dos resultados do Programa. Na oportunidade verificou-se que a maioria das ações propostas nos relatórios já haviam sido implementadas ou estavam em fase final de implantação, tendo em vista o baixo tempo de retorno de investimento que será apresentado a seguir.

2.7 Resultados

As principais ações de eficiência energética propostas nos relatórios referem-se a: adequação da pressão de operação dos compressores, redução da temperatura do ar de sucção e redução dos vazamentos, a partir de soluções técnicas embasadas na seção anterior deste artigo.

A seguir é apresentado um resumo das principais ações propostas em cada indústria, os quais estão indicados nas Tabelas 1 a 4.

TABELA 1 - Resumo das ações sugeridas - Empresa A

Ação	Investimento [R\$]	Economia [MWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [meses]
Ajuste de <i>setpoints</i> dos compressores	0,00	204	59.890,00	Imediato
Redução de pressão do ar comprimido de 8 para 5 kgf/cm ²	209.440,00	240	70.277,00	36
Programa de redução de vazamentos	16.229,77	91,7	26.868,10	7,2
Troca das Bombas de vácuo de acionamento a ar comprimido por bombas de vácuo	14.000,00	116,7	34.183,00	5

² A velocidade do ar na sucção foi medida para se obter indiretamente, através da equação da continuidade, a vazão de ar comprimido.

elétricas				
TOTAL	239.670,00	652,4	191.218,00	15

TABELA 2 - Resumo das ações sugeridas - Empresa B

Ação	Investimento [R\$]	Economia [MWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [meses]
Eliminação dos vazamentos da rede e posterior retirada de um dos compressores de operação	36.069,00	377	79.547,00	5,4

TABELA 3 - Resumo das ações sugeridas - Empresa C

Ação	Investimento [R\$]	Economia [MWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [meses]
Instalação de válvulas automáticas	2.640	71,5	19.448	2
Sistema Inteligente com Solenoide Ultra Rápido.	30.000	257	69.904	5
Redução de 70% dos vazamentos na Rede Primária	36.070	1.411	383.792	1
TOTAL	68.710	1.740	473.144	2

TABELA 4 - Resumo das ações sugeridas - Empresa D

Ação	Investimento [R\$]	Economia [MWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [meses]
Redução de 70% dos vazamentos na rede primária	36.069,77	399,45	74.874,03	5,8
Instalação de dutos de exaustão nos compressores, para redução da temperatura de sucção	5.900,00	8,7	1.630,73	43
Total	41.970,00	408,15	76.505,00	6,6

A seguir apresentam-se a economia anual, o investimento, o *payback* médio geral e individual, das quatro indústrias, estratificada de acordo com o tipo da ação de eficiência energética proposta, conforme indicado na Figura 7.

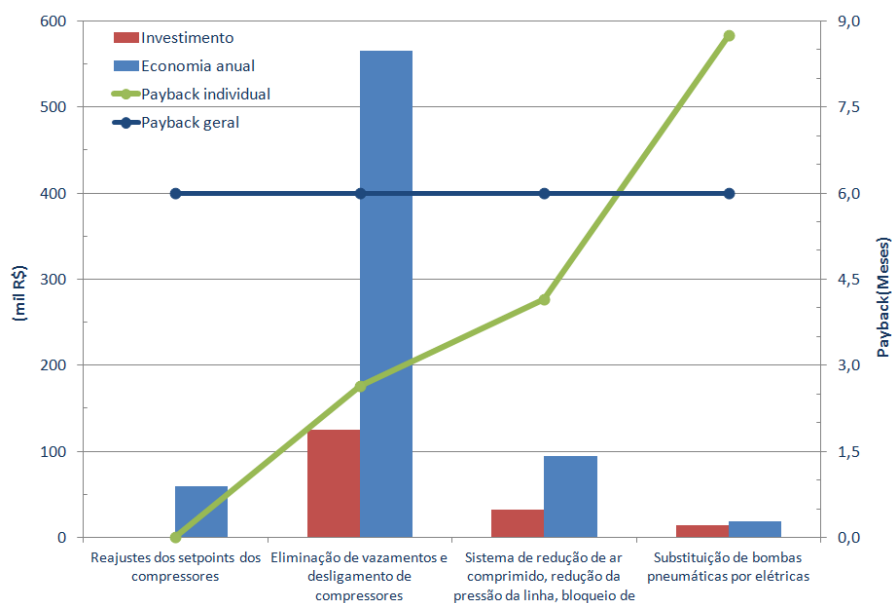


Figura 8 - Economia de energia, investimento e *payback* médio das ações propostas

Identificar os potenciais de economia de energia, em MWh, não necessariamente significa que eles serão implementados. Muitas das vezes, a decisão de se implementar ou não uma determinada ação, necessita de uma decisão gerencial. Para orientar essa decisão é necessário apresentar nos diagnósticos energéticos o indicador econômico que o industrial utiliza para tomada de decisão. No caso destes diagnósticos, se fosse necessário escolher entre as ações propostas, o programa de redução de vazamentos deve ser adotado por possuir um elevado potencial de economia de energia e um baixo tempo de retorno de investimento, conforme indicado na Figura 8.

3.0 - CONCLUSÃO

A energia elétrica do município de Manaus historicamente é gerada a partir de fontes térmicas fazendo parte do sistema isolado. Com a interligação, alguns clientes da Amazonas Energia tem a possibilidade técnica de se tornarem consumidores livres, tornando importante para a concessionária realizar ações que busquem a fidelização de seus clientes.

Considerando ainda que a indústria é responsável por aproximadamente 32% do consumo de energia elétrica no Estado do Amazonas conclui-se que ações de eficiência energética junto às indústrias do Polo Industrial de Manaus (PIM), como o apresentado neste Trabalho devem ser incentivadas, pois auxiliam na redução dos custos de produção do setor industrial e na redução produção da energia elétrica necessária para atender a demanda do sistema elétrico, postergando investimentos nesse setor.

Os resultados apresentados mostram que a atuação sistêmica baseada em intervenções operacionais, de manutenção, além de substituições de equipamentos devem ser priorizadas, tendo em vista o baixo tempo de retorno de investimento.

Em termos energéticos, as ações recomendadas nos quatro relatórios indicam uma economia estimada de 3,5 GWh/ano. Essa economia foi considerada satisfatória pela Eletrobras tendo em vista que o projeto foi realizado em apenas quatro indústrias e em somente um sistema motriz.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Resenha mensal do mercado de energia elétrica; RIO DE JANEIRO –Brasil, 2014.
- (2) MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço de Energia Útil; BRASÍLIA – Brasil, 2014.
- (3) CNI, Eletrobras. Eficiência Energética na Indústria; BRASÍLIA – Brasil, 2009.
- (4) FERREIRA, C. A. et al. Atuação da Eletrobrás, através do Procel, na Eficiência Energética de Indústrias Brasileiras. In: Anais do 8th Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission, CLAGTEE, 2009
- (5) ALMEIDA, A., FONSECA, P., FERREIRA, F., FALKNER, H., REICHERT, J., TÖNSING, E., MALMOSE, K., PREVI, A., DOMINIONI, A., PILLO, M., RUSSO, S., GUISSÉ, F., BLAISE, J., CLAIR, E., DIOP, A. Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives; COIMBRA - Portugal, 2000.
- (6) HAHN, A. Compressores – Guia Avançado; RIO DE JANEIRO - Brasil, 2004.
- (7) SHAPIRO, Howard Al. "Fundamentals of Engineering Thermodynamics."

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Aparecido Ferreira
Nascido em Oliveira Fortes, MG, em 31/03/1978
Doutor em Engenharia Elétrica: PUC-Rio
Empresa: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS, desde 2003
Engenheiro da Divisão de Eficiência Energética no Setor Privado
Professor do curso de engenharia elétrica no Cefet/RJ

