

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CLARA THINASSI PERINI

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ATRAVÉS DO USO DE
MOTORES *W-MAGNET* EM SISTEMAS DE EXAUSTÃO INDUSTRIAL
COM APLICAÇÃO DE FILTROS MANGA**

VIÇOSA
2017

CLARA THINASSI PERINI

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ATRAVÉS DO USO DE
MOTORES *W-MAGNET* EM SISTEMAS DE EXAUSTÃO INDUSTRIAL
COM APLICAÇÃO DE FILTROS MANGA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo

VIÇOSA
2017

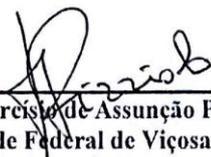
CLARA THINASSI PERINI

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ATRAVÉS DO USO DE
MOTORES *W-MAGNET* EM SISTEMAS DE EXAUSTÃO INDUSTRIAL
COM APLICAÇÃO DE FILTROS MANGA**

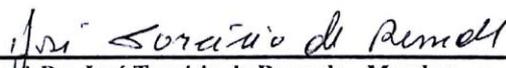
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de julho de 2017.

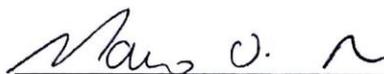
Comissão examinadora



Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcuta)

Dedico este trabalho aos meus pais, meu irmão, meu namorado e a toda minha família, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até essa etapa da minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me dar força e saúde nessa jornada, para superar as dificuldades e comemorar as conquistas. Agradeço também pelos amigos que Ele colocou no meu caminho e por guiar a minha escolha.

Ao meu orientador, Professor Tarcísio de Assunção Pizziolo, por acreditar na minha capacidade de realização desse trabalho e por todo o apoio e orientação concedida. Além disso, agradeço aos outros professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica por esses anos de amizade.

À Universidade, seu corpo docente, direção e administração por todas as oportunidades concedidas, pelo ambiente criativo e amigável.

Às empresas que cederam o espaço e os dados para a realização desse estudo.

Aos amigos da faculdade, aos membros e ex-membros da RepdoBem, aos amigos do intercâmbio e aos amigos de longa data, pelo apoio, carinho, paciência e amizade.

Aos meus pais, Dulce e Márcio, ao meu irmão, Júnior, e ao meu namorado Alex, pelo exemplo, conselhos, incentivo e por todo o amor. Aos meus avôs e a toda minha família, pela união, amor e carinho. Aos meus anjos Vó Titida, Vó Cornélia e Maria Clara, que sempre olham por mim.

Resumo

O setor industrial é responsável por quase metade do consumo de energia do país. Dessa forma, o interesse em investir em eficiência energética nesse setor vem aumentando ao longo dos anos. Além disso, esse investimento é vantajoso para as próprias indústrias, visto que reduzir os custos e gerar maior produtividade sempre foi o seu desafio principal.

O setor industrial brasileiro apresenta alto custo com energia elétrica devido ao grande desperdício resultante do mau uso, principalmente por ser composto ainda, em boa parte, por máquinas e equipamentos ineficientes energeticamente. Esse trabalho propõe uma solução de eficiência energética para um setor específico: o sistema de exaustão com o uso de filtros manga e será desenvolvido e analisado em empresas de diferentes setores.

O sistema consiste em usar um motor de ímãs permanentes desenvolvido pela empresa WEG (Wmagnet) acionado por um inversor de frequência. Esse equipamento por si só é mais eficiente e consome menos energia que os motores usuais das indústrias. Além disso, um sistema de monitoramento da pressão nos dutos de exaustão será implementado, através do equipamento DPS 20-REG, o qual controla a variação da velocidade do motor W-magnet em função das variações de pressão detectadas.

Sendo assim, foi realizado um estudo comparativo entre parâmetros medidos sobre um sistema de exaustão industrial com e sem esse equipamento, verificando quais são as influências do mesmo no ramo da eficiência energética.

Palavras - chaves: Eficiência energética, Wmagnet, Inversor de frequência

Abstract

The industrial sector represents almost half of the Brazil's power consumption. In this way, the ecological interest in investing in energy efficiency has been increasing over the years. Plus, this investment is useful for plants that aim always at reducing its cost of production. It is important to note that this sector wastes a lot of energy because of using old engines and processes with low performances. Hence the relevance of this study.

This work is, indeed, about a specific application of energy efficiency: the mango filter for exhaust systems. This one is used in several fields of industries. The system consists of using the permanent magnet motor developed by the WEG company (Wmagnet) driven by a frequency inverter. This equipment by itself is more efficient and consumes less energy than the usual engines of the industries. In addition, a pressure monitoring system in the exhaust data will be implemented, through the DPS 20-REG equipment, which controls a variation of the W-magnet motor speed depending on the pressure variations detected.

Thus, a comparative study was performed between the measured parameter on an industrial exhaust system with this equipment, verifying which are the influences of that in the branch of the energy efficiency.

Keywords: Energy Efficiency, Wmagnet, Frequency Inverter

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Eficiência energética.....	14
1.1.1	Conceito e considerações sobre eficiência energética.....	14
1.1.2	Eficiência energética na indústria.....	15
1.1.3	Métodos de implementação de eficiência energética na indústria	15
1.2	Sistema de exaustão.....	16
1.2.1	Filtros Manga.....	17
1.2.2	<i>Dampers</i> (válvulas)	19
1.2.3	Comportamento de um sistema com ventiladores.....	20
1.3	Objetivo Geral	21
2	Materiais e Métodos	22
2.1	Descrição dos componentes do sistema.....	22
2.1.1	Motor <i>Wmagnet</i>	22
2.1.1.1	Motores de ímã permanente	22
2.1.1.2	Ímãs permanentes	24
2.1.1.3	Motores Weg <i>Wmagnet</i>	25
2.1.2	O inversor CFW11 Magnet	28
2.1.3	Regulador Eletrônico de Pressão DPF 20-REG	29
2.2	Sistema de exaustão em estudo	30
2.3	Aquisição de dados.....	32
2.3.1	RE6000.....	32
2.3.2	Visita técnica	34
3	Resultados e Discussões.....	36
3.1	Análises de cases da Weg.....	36
3.2	Análises na empresa Itatiaia	41
3.3	Análises na empresa By Fiapo	43
4	Conclusão	51
	Referências Bibliográficas	52
	Apêndice A – Gráficos de medições ampliados	54

Lista de Figuras

Figura 1 – Componentes de um sistema de exaustão industrial.	17
Figura 2 - Filtro manga e o sistema de exaustão industrial.	18
Figura 3 - Princípio de funcionamento do filtro manga.	19
Figura 4 - Dampers de acionamento manual.	20
Figura 5 – Curva conjugado x velocidade do sistema com ventiladores.	21
Figura 6 - Motor de ímãs superficiais à esquerda e de ímãs internos à direita.	23
Figura 7 - – Motor do tipo <i>Brushless</i> AC à esquerda e do tipo <i>Brushless</i> DC à direita.	24
Figura 8 - Curva de histerese.	25
Figura 9 - Curva de torque versus velocidade para motores com ímãs internos.	26
Figura 10 - Curva de comparação do rendimento entre três linhas de motores da Weg: <i>Wmagnet, Standard</i> e <i>Alto Rendimento Plus</i>	27
Figura 11 - Comparação entre o tamanho de um motor <i>Wmagnet</i> e um motor de indução de mesma potência.	27
Figura 12 - Comparação entre os níveis de ruído de um motor <i>Wmagnet</i> e de motores de indução da linha <i>Standard</i> e <i>Alto Rendimento Plus</i>	28
Figura 13 - Inversor de frequência CFW11 da Weg.	29
Figura 14 - Regulador de pressão DPF 20-REG.	30
Figura 15 - Representação do sistema de exaustão.	31
Figura 16 - Diagrama de blocos correspondente ao controle do modelo de exaustão proposto.	31
Figura 17 - RE6000.	32
Figura 18 - Empresa By Fiapo em Juiz de Fora.	33
Figura 19 – Sistema de exaustão da Empresa Itatiaia Móveis S/A ES.	34
Figura 20 - Empresa Valdemóveis em Ubá.	35
Figura 21 - Sistema de exaustão e seção de rebarbação da empresa Weg.	36
Figura 22 - À esquerda, motor de indução, usual em sistemas de exaustão e à direita, motor <i>Wmagnet</i> com acionamento de inversor de frequência.	37

Figura 23 - Instalação do regulador de pressão e de <i>dampers</i> no sistema de exaustão.	37
Figura 24 - Resultado das medições de antes e depois da troca dos equipamentos do sistema de exaustão.	38
Figura 25 – Filtros mangas com as mangas desgastadas.	39
Figura 26 – Curva de rendimento x velocidade do motor <i>Wmagnet</i> e de um motor de indução.	43
Figura 27 – Potência ativa medida no motor de 25CV em estudo (Gráfico ampliado no Apêndice A).	44
Figura 28 - Potência ativa medida no motor de 30 CV em estudo (Gráfico ampliado no Apêndice A).	44
Figura 29 – Novo modelo de sistema de exaustão instalado na empresa By Fiapo.	45
Figura 30 - Potência ativa medida no motor de 75 CV em estudo (Gráfico ampliado no Apêndice A).	46
Figura 31 – Medição de corrente para a fase A do motor de 25 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).	48
Figura 32 - Medição de corrente para a fase A do motor de 30 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).	49
Figura 33 - Medição de corrente para a fase A do motor de 75 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).	49
Figura 34 - Curva de medição do fator de potência para o motor de 30 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).	50
Figura 35 - Curva de medição do fator de potência para o motor de 75 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).	50

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultado das medições de antes e depois da troca dos equipamentos do sistema de exaustão.....	38
Tabela 2 - Resultado para o sistema de axaustão com o motor de 250 CV.....	40
Tabela 3 - Resultado para o sistema de axaustão com o motor de 400 CV.....	40
Tabela 4 – Potência media consumida pelos motores do sistema de exaustão da empresa Itatiaia.	41
Tabela 5 - Valor mensal referente a cada motor.....	42
Tabela 6 - Resultado para o sistema de exaustão da empresa By Fiapo.	47

1 Introdução

A conscientização sobre os impactos ambientais provocados pelo homem iniciou-se na década de 70 e desde então organizações mundiais, grandes e pequenas empresas e os governantes se mobilizam para discutir possíveis soluções para desacelerar o consumo e torná-lo sustentável. Sabe-se que parte desses impactos ambientais é gerado pela produção de energia elétrica, mas essa produção e seu consumo é indispensável e necessário para o desenvolvimento mundial e o crescimento econômico das nações (INATOMI, 2008). Esse trabalho propõe uma solução para um setor específico, a indústria, a qual representa uma parcela significativa desse consumo de energia.

1.1 Eficiência energética

1.1.1 Conceito e considerações sobre eficiência energética

Eficiência energética é o uso racional de energia elétrica, ou seja, é uma relação entre a quantidade de energia consumida em uma determinada atividade e a quantidade disponibilizada para a realização da mesma. Portanto, esse conceito está diretamente relacionado às perdas e aos gastos de um estabelecimento comercial, residencial ou industrial (ABESCO, 2015).

No Brasil, programas nacionais como o PROCEL foram criados desde a década de 80 para regulamentar a produção e a utilização de energia (Viana et al., 2012). Porém pode-se falar que somente após a crise energética, que afetou o fornecimento e a distribuição de energia elétrica no país em 2001 e 2002, políticas de racionamento e discussões governamentais sobre o assunto tomaram maiores proporções (INATOMI, 2008). Um marco importante para a implementação da eficiência energética ocorreu com a aprovação da Lei 10.295 em 2001, a qual estabelece níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados e comercializados no país (ANEEL, 2001).

O Plano Nacional de Energia (PNE 2030) foi um estudo desenvolvido pela EPE (EPE, 2007) associada ao Ministério de Minas e Energia, em 2007, que propõe a meta de 10% de economia no consumo total de energia elétrica do país até 2030, através da melhoria da

eficiência dos sistemas energéticos por meio da elaboração de um plano específico para direcionar essas atividades (EPE, 2007). Essa e outras políticas adotadas permitem verificar a importância da energia economizada e da demanda evitada, transformando o mercado de energia elétrica (ANEEL, 2015).

1.1.2 Eficiência energética na indústria

Dentro do cenário de políticas de eficiência energética, é importante destacar a parcela ocupada pelas indústrias, as quais são responsáveis por cerca da metade do consumo de energia elétrica do país (Pompermayer,[2014]). Além disso, o levantamento realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) relata que a energia corresponde a 4,3% do custo direto da produção industrial, deste 83,7% refere-se à energia elétrica (GUARDIA et al., 2010).

Cabe ressaltar que o alto custo com energia elétrica desse setor deve-se ao grande desperdício devido ao mau uso e aos equipamentos e máquinas antigos, que ainda estão muito presentes no setor industrial brasileiro. O preço elevado do MWh associado ao desperdício causado pelo mau uso, aumenta significativamente as despesas e afeta a produtividade desse setor (Pompermayer, [2014]).

Segundo Marco Aurélio Giancesini, coordenador do programa Indústria Mais Eficiente, “um aumento de 10% no investimento de eficiência energética no país pode economizar R\$3,87 bilhões em custos de produção, tornando-a mais competitiva”. Sendo assim, o gasto para as concessionárias de energia ampliarem a capacidade de geração pode ser 70% maior que o gasto com a implementação de políticas de eficiência energética dentro das indústrias. Além disso, para esse setor, gerar maior produtividade com o menor investimento sempre foi o principal desafio (Pompermayer, [2014]).

1.1.3 Métodos de implementação de eficiência energética na indústria

Quando o assunto é eficiência energética no setor industrial, há alguns pontos principais que devem ser abordados. Geralmente a maior parte do consumo energético nesse setor está localizada nos maquinários, transformadores, iluminação, em processos de exaustão, climatização, perdas em redes de ar comprimido, entre outros. Além disso, uma simples análise da tarifação contratada pelo consumidor à concessionária pode implicar em redução de despesas com a eletricidade (Viana et al., 2012).

Um exemplo é a presença de um maquinário desatualizado no cenário industrial brasileiro, sendo ele responsável por um grande desperdício de energia, uma vez que eles não oferecem mais o rendimento adequado, limitando a capacidade de funcionamento dos equipamentos aos quais estão associados. Além disso, eles necessitam de procedimentos de manutenção mais frequentes, aumentando o custo e reduzindo a produtividade devido às paradas da fábrica para manutenção (Pompermayer, [2014]).

Ainda deve-se destacar que a economia está associada ao número de horas de uso de um equipamento e, portanto, a substituição de um motor de baixo rendimento por um eficiente não representa um custo tão significativo quanto a troca de um sistema completo (Pompermayer, [2014]). Dessa forma, a empresa WEG, juntamente com a empresa Renner, desenvolveu uma solução de eficiência energética para o sistema de exaustão com o uso de filtros manga, a qual será discutida nesse trabalho (Weg, [2017]).

1.2 Sistema de exaustão

O sistema de exaustão é responsável por captar os poluentes de uma fonte (gases, vapor, poeiras tóxicas, entre outras) antes que os mesmos se dispersem no ambiente de trabalho, sendo uma importante medida de controle de riscos e contribuindo para a saúde do trabalhador (ELETROBRÁS, 2008). O seu principal componente é um exaustor, dispositivo mecânico utilizado para converter energia mecânica de rotação, aplicada em seus eixos, em aumento de pressão do ar. O exaustor é um ventilador que funciona no sentido de exaurir o ar de um ambiente (ELETROBRÁS, 2008).

Um sistema de ventilação difere de um sistema de exaustão na medida em que o ventilador empurra o ar e o exaustor succiona o ar. Sendo assim, o primeiro não promove a troca de ar do ambiente, mas somente a sua circulação, o que é ineficiente em ambientes comerciais e industriais, uma vez que há uma grande aglomeração de pessoas, que geram calor e odores e há partículas contaminantes no ar. Portanto, usa-se a exaustão em um ambiente industrial. (ELETROBRÁS, 2008).

O sistema de exaustão é composto pelos seguintes componentes (MACINTYRE, 1990), que podem ser visualizados na Figura 1:

1. Coletores ou captosres: estão diretamente conectados aos equipamentos de forma a enclausurar parte da fonte e são responsáveis por coletar os poluentes para os dutos do sistema de exaustão. Os poluentes serão arrastados para dentro do captor por meio de correntes de ar em velocidades determinadas.
2. Sistema de dutos: é o sistema de transporte das partículas, que deve ser instalado de acordo com o *layout* da fábrica interligando os captosres ao sistema de coleta. Ele deve ser do menor tamanho possível, a fim de minimizar a perda de cargas e o gasto de energia. É necessário para que as partículas, geralmente em estado gasoso, não se dispersem pelo ar.
3. Sistema coletor-exaustor: é composto por um coletor das partículas, normalmente com um filtro, e um exaustor, que é o responsável pela movimentação do ar durante todo o sistema. O exaustor pode estar localizado antes ou depois do coletor, sendo que na maioria dos casos ele é colocado após o coletor, evitando assim o contato do mesmo com as partículas sólidas captadas e o seu conseqüente desgaste.

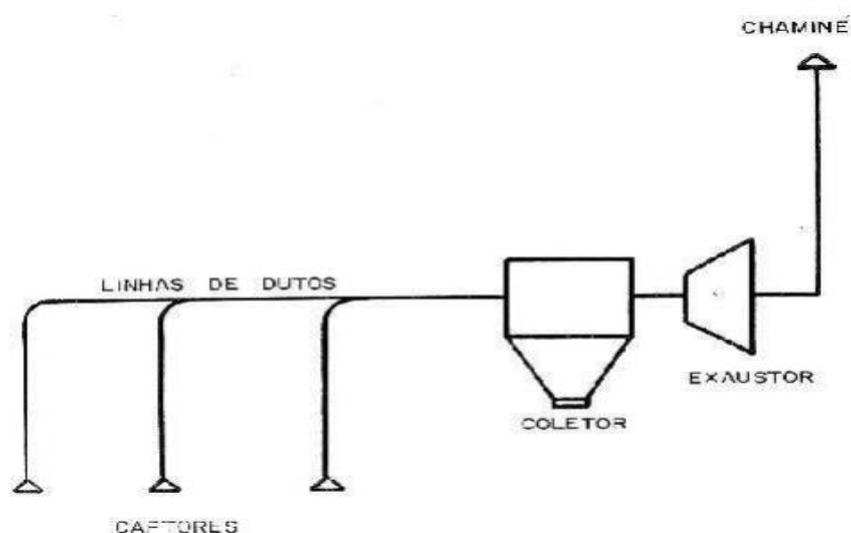


Figura 1 – Componentes de um sistema de exaustão industrial.

1.2.1 Filtros Manga

O filtro manga é um tipo de coletor muito usado no sistema de exaustão industrial. A Figura 2 ilustra esse equipamento.



Figura 2 - Filtro manga e o sistema de exaustão industrial.

O ar contaminado é introduzido no filtro manga pela sua antecâmara lateral, conectada aos dutos, dimensionada de modo a evitar o choque direto das partículas sólidas com as mangas e assim, reduzir a velocidade do fluxo. Em seguida, o ar é conduzido para a câmara central, onde estão localizadas as mangas, que consistem em filtros de forma cilíndrica que permitem a passagem do ar e retêm as partículas sólidas. Dessa forma, o ar isento de impurezas passa para o compartimento superior do filtro, saindo do mesmo por meio de bocais localizados em uma de suas laterais, enquanto as partículas sólidas ficam retidas no compartimento inferior do filtro manga. O princípio de funcionamento descrito pode ser verificado na Figura 3 (MACINTYRE, 1990).

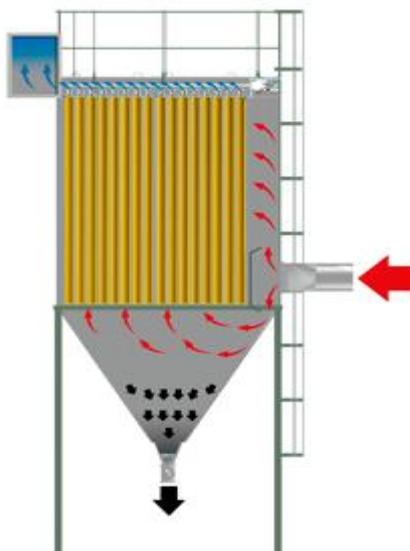


Figura 3 - Princípio de funcionamento do filtro manga.

Com a utilização, as mangas ficam impregnadas de pó, criando uma barreira que também atua como meio filtrante. Porém deve-se fazer uma limpeza periódica das mangas e na câmara inferior do filtro, evitando o desgaste dos mesmos. As características principais desse equipamento são: resistência à corrosão, grande espaço (comportando grandes vazões), possibilidade de entupimento e alto custo, mas altamente eficiente (MACINTYRE, 1990).

1.2.2 *Dampers* (válvulas)

Os *dampers* são válvulas presentes do duto do sistema de exaustão que controlam a vazão do fluido de trabalho. Esse controle pode ser manual ou automático, conforme a Figura 4. Quando esses registros são abertos ou fechados, as relações entre as grandezas de pressão, vazão e velocidade são modificadas (Viana et al., 2012).

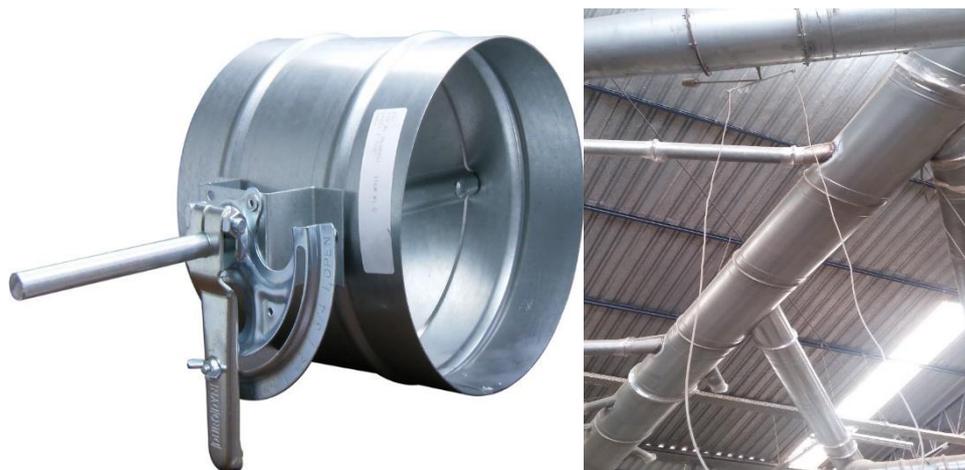


Figura 4 - Dampers de acionamento manual.

1.2.3 Comportamento de um sistema com ventiladores

O sistema com ventiladores, com variação do fluxo, apresenta um comportamento diferente com relação aos parâmetros de vazão (Q), pressão total (P), velocidade de rotação (w) e momento de inércia (Jc). Portanto, a curva do conjugado x rotação deve ser estudada, para que o princípio de funcionamento do sistema seja compreendido. Ele é regido pelas Equações 1 a 3, que valem para pontos de mesmo rendimento e são equações aproximadas que representam a relação entre a variação da vazão, diferença de pressão e potência com a variação da rotação do ventilador, respectivamente (Viana et al., 2012).

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{w_2}{w_1} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_{t2}}{\Delta P_{t1}} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{Potência_1}{Potência_2} = \frac{\Delta P_{t2} * Q_2}{\Delta P_{t1} * Q_1} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^3 \quad (3)$$

Uma vez que o torque (ou conjugado) pode ser determinado pela Equação 4, conclui-se que o mesmo é proporcional ao quadrado da variação de velocidade rotacional do ventilador, como verificado na curva da Figura 5. Além disso, a relação entre potência e energia é estabelecida pela Equação 5 (WEG, 2017).

$$Potência = \tau * w \quad (4)$$

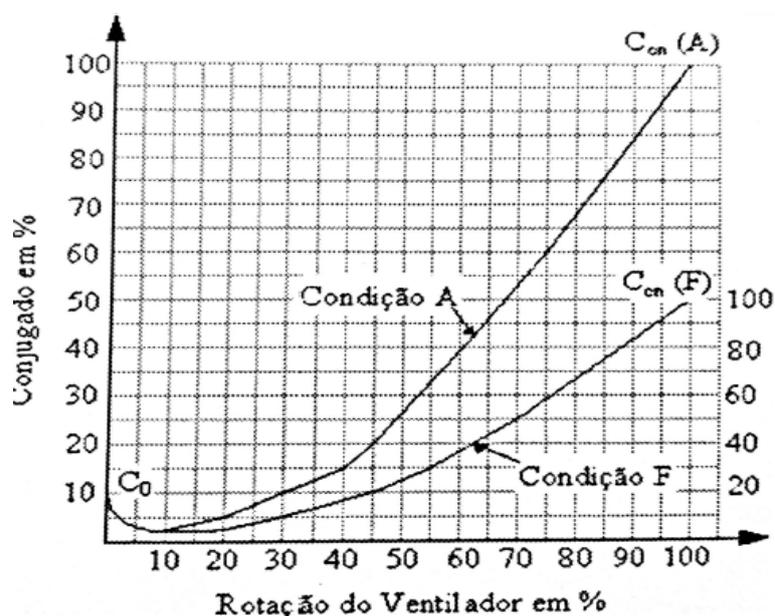


Figura 5 – Curva conjugado x velocidade do sistema com ventiladores.

$$Energia = Potência * t \quad (5)$$

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo apresentar e avaliar a eficácia da substituição do motor usado no sistema de exaustão de uma indústria pelo motor *Wmagnet* e o seu correspondente inversor de frequência, quanto à eficiência energética relacionada a esse procedimento.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Estudar o sistema de exaustão em questão, com a presença do motor *Wmagnet*, inversor de frequência CFW11 e o regulador de pressão DPF 20-REG;
- Avaliar a eficiência energética do sistema sem o regulador de pressão DPF 20-REG;
- Avaliar a relação custo-benefício referente à implementação do método analisado para a indústria;
- Avaliação da aplicabilidade do método em estudo.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Descrição dos componentes do sistema*

2.1.1 Motor Wmagnet

2.1.1.1 Motores de imã permanente

Os motores de imãs permanentes são máquinas síncronas que não possuem enrolamento de campo, escovas ou que necessitam de uma fonte de alimentação de tensão contínua. Os seus enrolamentos de campo são substituídos por imãs permanentes e quanto mais potentes forem esses imãs, maior será a capacidade máxima de rotação da máquina (CHAPMAN; STEPHEN, 2013). Embora os motores de indução sejam os mais presentes na indústria, os motores de imã permanente são cada vez mais estudados e seu uso está em ampla expansão, devido às suas características: alto rendimento, baixo volume e peso, torque suave, baixo nível de vibração e ruído e o uso dos imãs de Neodímio Ferro Boro, a partir dos anos 80, que são imãs com elevada concentração de energia e que permitiu um aumento do número de aplicações desse motor (WEG, 2007).

A estrutura interna desse motor é composta pelo indutor, o qual é responsável por gerar o fluxo de excitação da máquina e pelo estator. O indutor é constituído pelos imãs permanentes e situa-se no rotor. Já o estator é constituído pelos enrolamentos trifásicos, dispostos em ranhuras (CHAPMAN; STEPHEN, 2013). Dessa forma, a sua constituição física é semelhante à das máquinas síncronas convencionais, diferindo principalmente nas configurações rotóricas.

Quanto à configuração dos imãs no rotor, esses podem ser classificados como superficiais ou internos, conforme Figura 6. O primeiro possui as indutâncias do eixo direto e do eixo de quadratura praticamente iguais e constantes, sendo conhecido como motor de pólos lisos. Já o segundo, possui saliências e, portanto, suas indutâncias do eixo direto e de quadratura são diferentes (WEG, 2007).

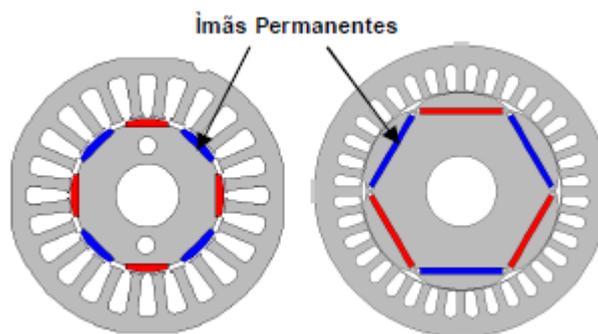


Figura 6 - Motor de ímãs superficiais à esquerda e de ímãs internos à direita.

O seu princípio de funcionamento é semelhante ao do motor síncrono eletroexcitado: quando os enrolamentos trifásicos do estator estão ligados à rede, em condições normais, um sistema trifásico de correntes simétricas vai percorrê-los. Com essas correntes, um campo magnético girante é induzido no entreferro com uma frequência igual a das correntes que circulam no estator. Chama-se de velocidade síncrona a velocidade desse campo magnético induzido. Além desse, um campo magnético girante de excitação também é gerado, devido à presença dos ímãs permanentes, quando o rotor gira na velocidade de sincronismo (campo magnético principal da máquina). Devido ao efeito da interação entre esses dois campos magnéticos surge um binário eletromagnético, um campo magnético resultante. Chama-se de reação magnetizante quando o campo magnético induzido no estator tem efeito aditivo ao campo magnético gerado pelos ímãs do rotor, característico de uma máquina que trabalha como motor (CHAPMAN; STEPHEN, 2013).

Uma característica importante desse tipo de máquina é o fato da força magnetomotriz do rotor ter sempre o mesmo valor, pois os ímãs permanentes apresentam a mesma indução magnética ao longo do tempo de vida útil do motor. Dessa forma, a máquina é mais robusta e eficiente, mas necessita do inversor de frequência para aplicações em que seja necessário variar a sua velocidade (CHAPMAN; STEPHEN, 2013; WEG, 2007). A sua vida útil depende somente dos isolamentos das bobinas, rolamentos e desmagnetização de seus ímãs, não sendo necessária a manutenção do motor. Porém os seus custos podem ser elevados, dependendo do ímã que for utilizado no motor. Além disso, deve-se aplicar uma velocidade máxima que não seja capaz de causar danos aos seus ímãs (WEG, 2007).

Existem dois tipos de motores síncronos de ímãs permanentes: o tipo *brushless* DC e o tipo *brushless* AC.

1. Tipo *Brushless* DC: é projetado para desenvolver uma forma de onda de força contra-eletromotriz trapezoidal e a forma de onda de corrente de alimentação retangular, conforme Figura 7. Para obter a forma trapezoidal, geralmente os seus ímãs são superficiais e o seu controle de acionamento é mais simples, pois não precisa de sensores de posição de alta resolução no rotor, uma vez que somente seis instantes de comutação de corrente para as três fases devem ser analisados a cada ciclo. São mais usados em aplicações de baixa potência (WEG, 2007).
2. Tipo *Brushless* AC: é projetado para que a força contra-eletromotriz e a corrente de alimentação sejam no formato senoidal, conforme Figura 7. Os seus ímãs permanentes podem ser superficiais ou internos e o controle de acionamento senoidal é mais complexo que o anterior: são necessários vários sensores de corrente em cada fase e um sensor de posição de alta resolução para manter a sincronização precisa da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor em cada instante de tempo. Eles são geralmente usados para aplicações que necessitam de alto desempenho (WEG, 2007).

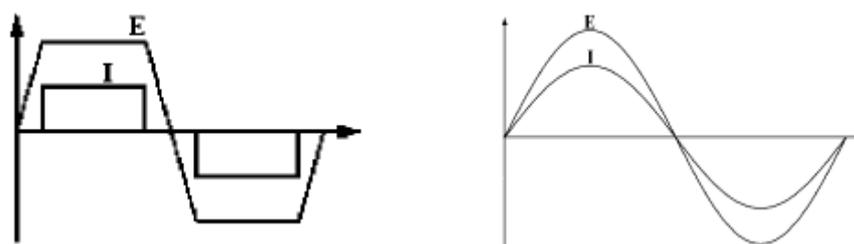


Figura 7 - – Motor do tipo *Brushless* AC à esquerda e do tipo *Brushless* DC à direita.

2.1.1.2 Ímãs permanentes

O estudo dos ímãs permanentes usados no rotor dos motores está diretamente relacionado ao seu desempenho. Para tanto, duas características devem ser analisadas: a coercividade e a remanência, ambas associadas à curva de histerese do material. A remanência é a indução magnética que permanece no circuito magnético após a remoção do campo magnético aplicado. Já a coercividade é a capacidade de um material magnético de manter os seus ímãs em uma determinada posição (CHAPMAN; STEPHEN, 2013).

Essas duas características são importantes na determinação da curva de histerese, a qual pode ser verificada na Figura 8, que representa a magnetização e desmagnetização do ímã. Supõe-se a substância ferromagnética inicialmente desmagnetizada e o campo magnético

aumentando gradativamente, partindo de zero até o valor de saturação. Quando o material é desmagnetizado, para um mesmo valor de campo, a imantação terá um valor maior, fenômeno que é chamado de histerese (atraso). Isso deve-se ao valor de remanência (CHAPMAN; STEPHEN, 2013).

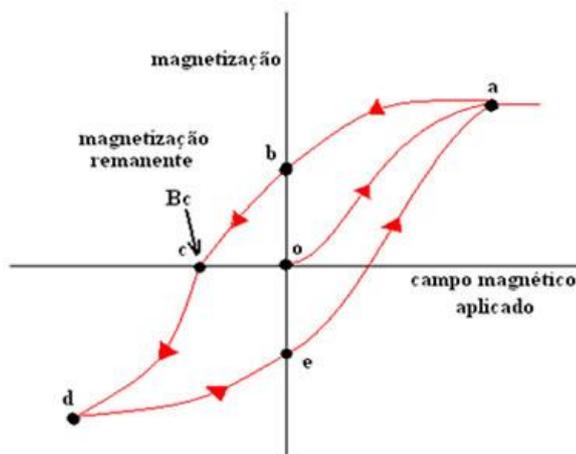


Figura 8 - Curva de histerese.

Para garantir o alto desempenho, é de grande interesse que os ímãs em uso apresentem alta coercividade e alta remanência, o que impede que o ímã seja facilmente desmagnetizado e resulta em um alto fluxo magnético, respectivamente. Comparando-se os ímãs de ferrite e de Neodímio Ferro Boro, tem-se que o primeiro apresenta valores mais elevados de coercividade e remanência, tendo, portanto, maior energia, mais são mais caros. Além disso, ambos apresentam alteração de suas propriedades com o aumento da temperatura. Porém, devido aos estudos realizados sobre esses materiais, suas propriedades estão cada vez mais aperfeiçoadas (WEG, 2007).

2.1.1.3 Motores Weg *Wmagnet*

Uma linha de motores produzida pela empresa Weg é conhecida como *Wmagnet*. São motores de ímã permanente, com ímãs internos e constituídos pelo material Neodímio Ferro Boro (NdFeB), com acionamento do tipo *Brushless* AC. Eles possuem alta confiabilidade, torque suave, baixos níveis de ruído e vibração, volume e peso reduzido, podem funcionar em uma ampla faixa de velocidade com torque constante e são autoventilados (WEG, 2007).

Por ser constituído de ímãs internos, possuem um maior torque resultante, uma vez que os pólos salientes produzem um torque de relutância que é somado ao torque eletromagnético

devido aos ímãs. Além disso, são capazes de funcionar em uma grande faixa de velocidade acima da nominal, com potência constante, pois apresenta uma maior indutância resultante no entreferro, como pode ser verificado na Figura 9 (WEG, 2007). A sua característica de torque nominal constante, para uma grande variação de velocidade, é observada em aplicações como esteiras transportadoras com funcionamento contínuo, britadores, compressores à pistão, entre outras (WEG, 2017).

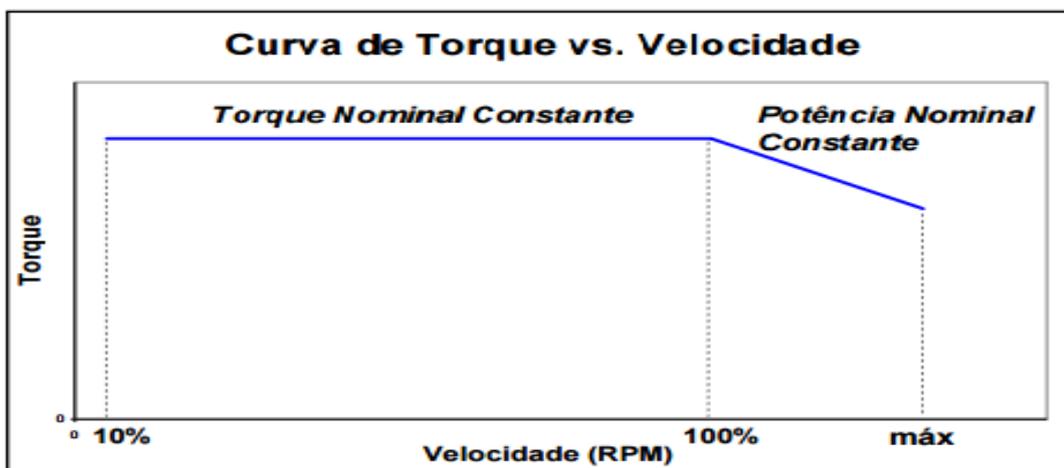


Figura 9 - Curva de torque versus velocidade para motores com ímãs internos.

Devido à composição de seus ímãs por NdFeB, as perdas por Efeito Joule no rotor são muito reduzidas se comparadas ao motor de indução com gaiola de esquilo. Uma vez que essas perdas são significativas no montante total de perdas de um motor, o *Wmagnet* possui por si só um rendimento muito maior que um motor de indução. Pode-se observar na Figura 10 uma comparação entre o seu rendimento e o encontrado em outras linhas de motores de indução Weg da linha *Standard* e Alto Rendimento *Plus* (WEG, 2007).

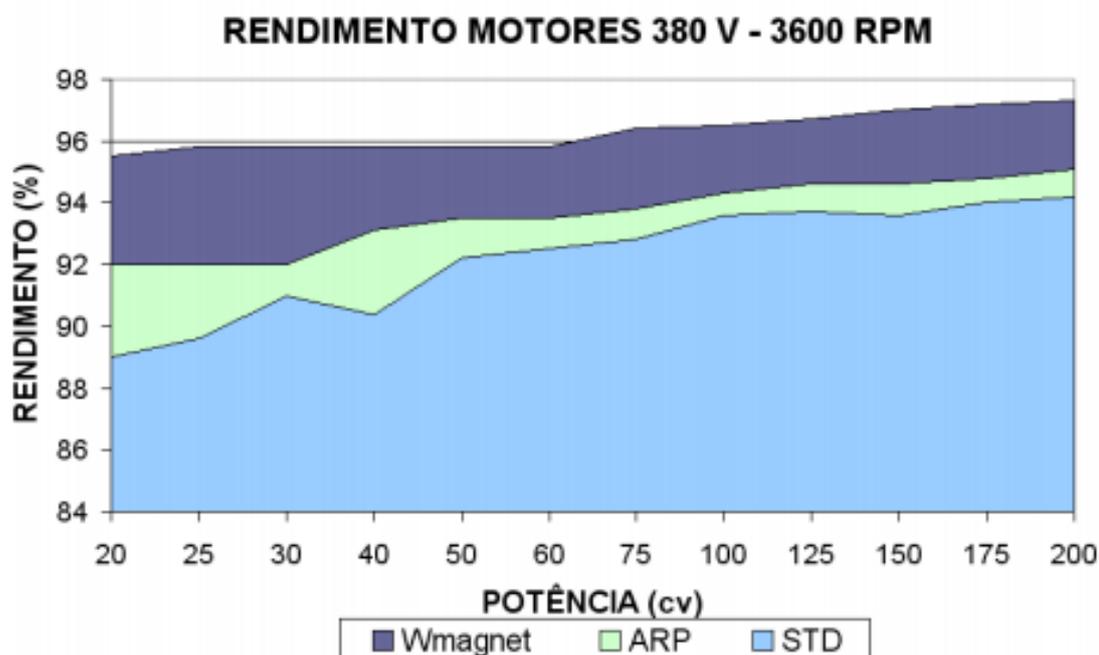


Figura 10 - Curva de comparação do rendimento entre três linhas de motores da Weg: *Wmagnet*, *Standard* e *Alto Rendimento Plus*.

A presença de ímãs no rotor demanda um espaço menor do mesmo. Além disso, essa redução nas perdas elétricas no rotor, devido à presença dos ímãs, garante uma menor elevação da temperatura, reduzindo o sistema de ventilação do motor. Como o *Wmagnet* é um motor autoventilado, isso permite a redução do seu volume e do seu peso em aproximadamente 47% e 36%, respectivamente, quando comparado a um motor de indução de mesma potência, o que pode ser verificado na Figura 11. O tempo de vida da máquina também é significativamente aumentado e o seu manuseio é facilitado (WEG, 2007).

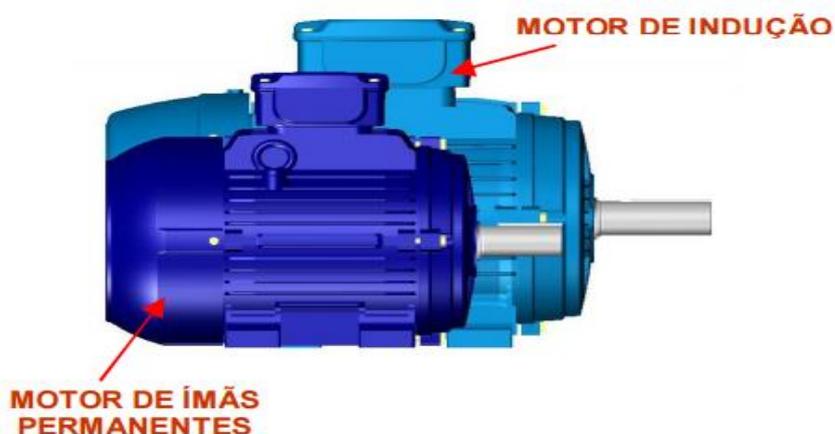


Figura 11 - Comparação entre o tamanho de um motor *Wmagnet* e um motor de indução de mesma potência.

Além disso, essa redução no sistema de resfriamento do motor permite reduzir significativamente os níveis de ruído causados pelo ventilador acoplado ao motor, se comparado com motores de indução da linha *Standard* e Alto Rendimento *Plus*, conforme pode ser verificado na Figura 12 (WEG, 2007).

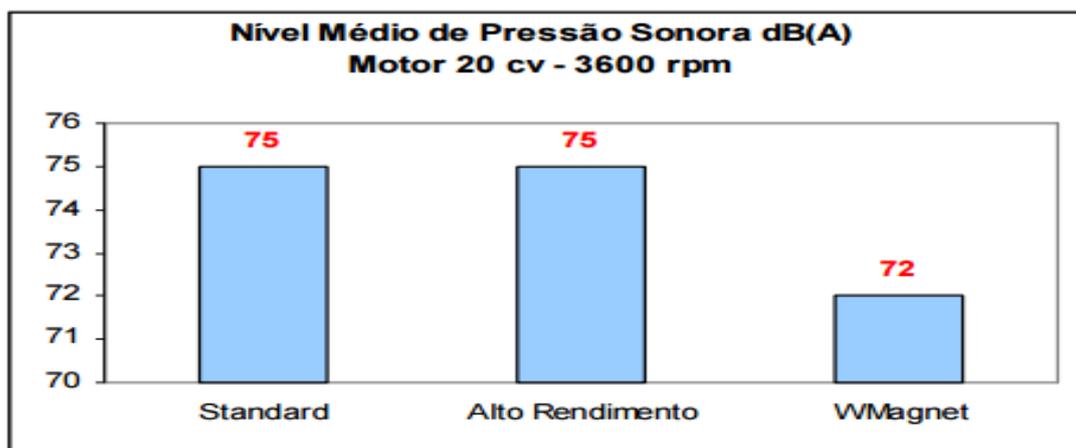


Figura 12 - Comparação entre os níveis de ruído de um motor *Wmagnet* e de motores de indução da linha *Standard* e Alto Rendimento *Plus*.

2.1.2 O inversor CFW11 Magnet

O uso de motores elétricos acionados por inversores de frequência tem aumentado expressivamente nos últimos anos, pois o mesmo permite um ajuste de velocidade, economia de energia, controle da posição e uma partida mais suave. Em diversas situações na indústria, a variação de velocidade com a manutenção do torque constante é necessária, sendo essa característica possível devido ao uso desse acionador (WEG, 2007).

Para o arranque de motores síncronos que não possuem o rotor em gaiola de esquilo, pode-se usar o inversor de frequência, pois a máquina não é capaz de desenvolver um torque de partida (CHAPMAN; STEPHEN, 2013). Além disso, com esse equipamento, pode-se variar a frequência de alimentação da rede (lembrando que essa frequência é fixa, no Brasil, em 60 Hz) mudando, conseqüentemente, a velocidade (WEG, 2004).

No acionamento do motor *Wmagnet* é necessário o uso do inversor de frequência CFW11 (Figura 13) que permite o controle do torque mesmo em velocidade nula e também em altas rotações, devido ao método de controle vetorial. Ele foi desenvolvido com o modo *sensorless*, no qual foi eliminado o sensor de posição de alta resolução necessário para acionar

motores do tipo *brushless* AC, através de um algoritmo de controle avançado. Dessa forma o custo do acionamento foi reduzido (WEG, 2007).



Figura 13 - Inversor de frequência CFW11 da Weg.

Com relação às harmônicas, o inversor em questão é equipado com indutores no barramento CC interno, os quais reduzem o conteúdo harmônico das correntes de entrada (WEG, 2015).

2.1.3 Regulador Eletrônico de Pressão DPF 20-REG

O DPF-20 (Figura 14) é um regulador eletrônico de pressão usado para medir, exibir e controlar a pressão diferencial através de um controlador proporcional integral e derivativo (PID), que consiste em uma técnica de comando de processos em malha fechada composta por três coeficientes (proporcional, integral e derivativo) que são variados de forma a obter a resposta ideal, ou seja, a resposta com o menor erro possível (DORF, 2001).

Esse controle é feito por um sinal de saída modulado que pode ser analógico (4 a 20 mA) ou digital (ON-OFF). Ele possui a capacidade de controlar um dispositivo, como um inversor de frequência, para manter a pressão medida pelo sensor presente no interior do instrumento em um valor constante predefinido (AUTEL, 2000).



Figura 14 - Regulador de pressão DPF 20-REG.

2.2 Sistema de exaustão em estudo

O novo modelo para o sistema de exaustão industrial foi desenvolvido pelo setor de Serviço da empresa Weg em parceria com a empresa Renner Têxtil Ltda. Ele consiste na substituição do motor usual desse sistema pelo *Wmagnet*, em conjunto com o seu acionador e com um controlador de pressão (WEG, 2010).

O desenho esquemático do molde proposto pode ser visualizado na Figura 15. A idéia é realizar o controle da velocidade do exaustor, acionado pelo motor *Wmagnet*, com o auxílio do inversor de frequência CFW11, de acordo com a variação de pressão detectada pelo equipamento regulador de pressão. A Figura 16 contém o diagrama de blocos correspondente a esse controle. Dessa forma, quando uma máquina da indústria não estiver funcionando, o *damper* conectado ao duto correspondente a ela é fechado, o que varia a vazão (e consequentemente a pressão) do sistema. Isso pode acontecer a uma máquina de cada vez ou a um conjunto delas simultaneamente. Em seguida, o regulador de pressão envia um comando para o inversor de frequência reduzir a velocidade de rotação do exaustor, uma vez que a vazão presente no sistema é menor. O funcionamento contrário ocorre se um *damper* for aberto (WEG, 2010).

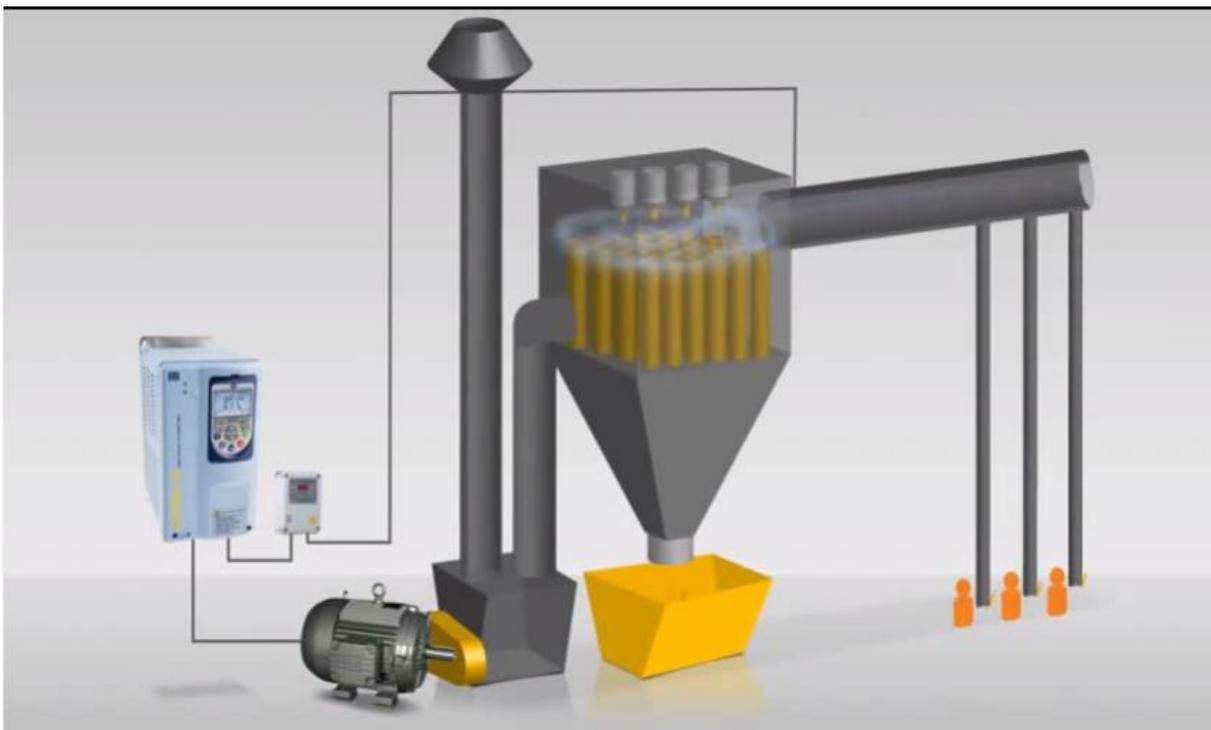


Figura 15 - Representação do sistema de exaustão.

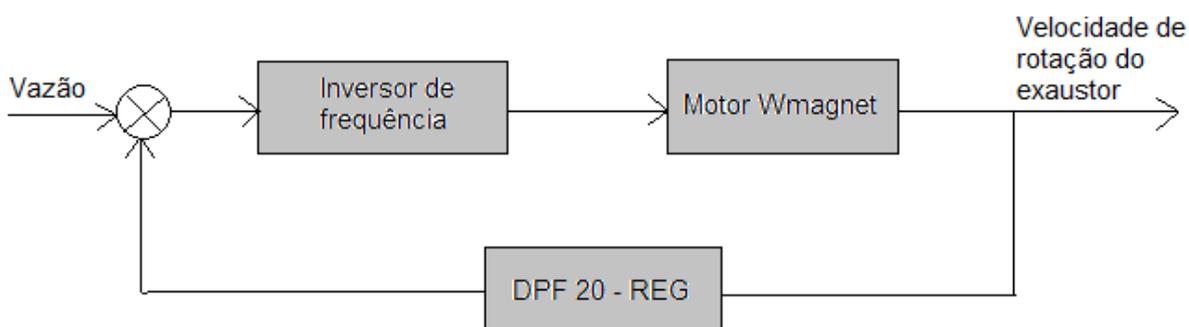


Figura 16 - Diagrama de blocos correspondente ao controle do modelo de exaustão proposto.

Portanto, com o controle da rotação do exaustor, evitam-se perdas no sistema, uma vez que a vazão de ar nos dutos será proporcional e correspondente ao número de máquinas da indústria em funcionamento, sendo mais eficiente. É importante ressaltar que em grande parte das indústrias brasileiras, o sistema de exaustão apresenta um funcionamento contínuo, sendo que a velocidade de rotação do exaustor é praticamente constante durante todo o tempo útil.

O embasamento teórico para a compreensão do estudo foi feito com consultas a artigos técnicos editados pela empresa Weg, nos quais as características dos equipamentos foram bem detalhadas e descritas. Além disso, o trabalho também se baseia em *cases* realizados pela

mesma empresa, em que são explicitados resultados práticos de eficiência energética com o emprego do método citado.

2.3 *Aquisição de dados*

O objetivo é apresentar uma comparação entre o modelo usual de sistema de exaustão presente nas indústrias e o modelo eficiente com o uso do motor *Wmagnet* e o regulador de pressão. Para isso, esse trabalho irá se servir de dados coletados na empresa By Fiapo na cidade de Juiz de Fora, MG, além de medições realizadas pela empresa Racional de Ubá, MG e resultados práticos obtidos pela Weg. Também foram feitas algumas visitas técnicas em indústrias moveleiras no município de Ubá, MG, que adotaram o método completo ou que trocaram apenas o motor usual, sem realizar o controle de velocidade com a variação da pressão.

2.3.1 RE6000

A aquisição dos dados foi obtida com o equipamento RE6000 da Embrasul (Figura 17), o qual permite obter dados de corrente, tensão, potência, harmônicas, diagramas fasoriais, fator de potência, entre outros. Ele possui quatro canais para medir correntes e quatro para medir tensão, que são acoplados aos painéis elétricos. A partir de um sistema de aquisição de 16 bits, são feitas 133 amostras por ciclo nos oito canais, usando grandezas em RMS. Todo esse sistema de amostras é executado de forma simultânea e contínua para todas as grandezas envolvidas (EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA, 2015).



Figura 17 - RE6000.

As medições foram feitas na empresa By Fiapo (Figura 18), uma empresa de meias na cidade de Juiz de Fora, nas datas de 09 e 20 de fevereiro e 21 de junho de 2017. As duas primeiras correspondem, respectivamente, aos motores usuais de 25 e 30 CV e a última a um motor *Wmagnet* de 75 CV. A aquisição de dados para o motor usual pode ser feita com algumas horas para que se obtenha uma boa aproximação do seu consumo, visto que ele funciona durante todo o tempo útil da empresa de forma praticamente constante. Já para o motor *Wmagnet*, é necessário um dia de aquisição de dados para verificar o seu funcionamento de acordo com o ritmo de trabalho das máquinas, pois elas trabalham dentro de uma mesma rotina diária, com uma quantidade determinada de horas paradas e outra de maior produtividade e dessa forma, pode-se provar a sua eficiência.

A indústria de meias possui 69 máquinas ao total e uma parte do sistema de exaustão com dois motores comuns, sendo que os mesmos foram trocados por um motor *Wmagnet*, junto com o sistema de monitoramento de pressão.



Figura 18 - Empresa By Fiapo em Juiz de Fora.

Além disso, foram utilizadas medições obtidas pela empresa Racional Elétrica de Ubá, MG, na indústria Itatiaia Móveis S/A, em Jaraguá do Sul, ES (Figura 19), na data de 23 de abril de 2014. O seu complexo foi dividido em 8 sistemas de exaustão, com motores de diferentes potências e modelos:

- Sistema 01: motor *Wmagnet* 50CV;
- Sistema 02: motor *Standard* 60CV;
- Sistema 03: motor *Wmagnet* 100CV;
- Sistema 04: motor *Standard* 100CV;
- Sistema 05: motor *Standard* 100CV;
- Sistema 06: motor *Standard* 100CV;

- Sistema 07: motor *Standard* 60CV;
- Sistema 08: motor *Wmagnet* 60CV.



Figura 19 – Sistema de exaustão da Empresa Itatiaia Móveis S/A ES.

2.3.2 Visita técnica

Foi realizada uma visita técnica na empresa Valdemóveis localizada no município de Ubá, MG, (Figura 20), na qual todo o sistema de exaustão foi modificado, mas sem a presença do regulador de pressão.



Figura 20 - Empresa Valdemóveis em Ubá.

3 Resultados e Discussões

3.1 Análises de cases da Weg

Inicialmente, são apresentadas algumas análises e resultados obtidos pela empresa Weg, baseados em seus artigos técnicos. O sistema de exaustão com filtros manga da seção de rebarbação da área de Fundição I da empresa Weg (Figura 21), possui pelo menos três máquinas inoperantes em média 12 horas por dia devido às variações de demanda no processo. Dessa forma, os pontos de captação referentes a essas máquinas ficam exaurindo desnecessariamente, elevando o custo operacional do sistema como um todo (WEG, 2010).



Figura 21 - Sistema de exaustão e seção de rebarbação da empresa Weg.

Os motores de indução possuíam as seguintes características nominais: 50CV, 1710 RPM, 380V, fabricados em 2009, com acoplamento polia/correia e acionamento de partida direta. Eles foram substituídos pelo *Wmagnet*, com as respectivas características: 50CV, 1800 RPM, 380V, fabricados em 2009, com acoplamento polia/correia e acionado por inversor de frequência. Os dois equipamentos podem ser verificados na Figura 22. O regulador de pressão e os *dampers* também foram instalados, conforme Figura 23 (WEG, 2010).



Figura 22 - À esquerda, motor de indução, usual em sistemas de exaustão e à direita, motor *Wmagnet* com acionamento de inversor de frequência.



Figura 23 - Instalação do regulador de pressão e de *dampers* no sistema de exaustão.

Através de um analisador de energia, as medições foram feitas nos dois motores e o resultado pode ser observado pela Figura 24. Pode-se observar que somente a troca de motores já proporciona uma economia de 37,07% de energia. Com a instalação de *dampers* e o controle da velocidade de rotação do exaustor, essa economia foi ainda maior, chegando à 70,3% no momento em que três *dampers* estão fechados. Os resultados da análise podem ser verificados na Tabela 1 (WEG, 2010).

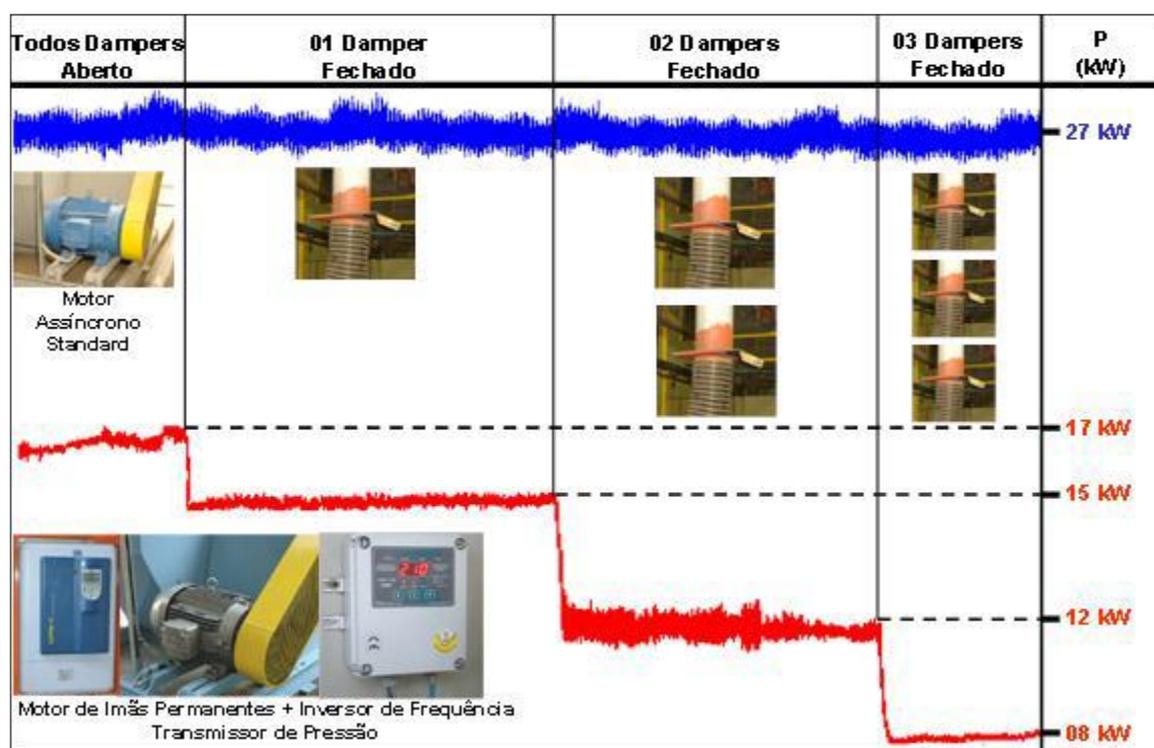


Figura 24 - Resultado das medições de antes e depois da troca dos equipamentos do sistema de exaustão.

Tabela 1 - Resultado das medições de antes e depois da troca dos equipamentos do sistema de exaustão.

Indicadores	Motor de indução	<i>Wmagnet</i> + inversor de frequência + DPF 20
Custo unitário do KWh	0,21	0,21
Horas de operação do motor/ano	6,456	6,456
KWh consumidos com todos dampers abertos	27	17
KWh consumidos com três dampers fechados	27	08
KWh médio consumido	27	12,5
Consumo anual (KWh)	174.312	80.700

Redução no consumo de energia (KWh/ano)	93.612
Redução de energia elétrica, em %	53,7
Economia de energia ao ano	19.658,52
Retorno do investimento	6 meses aproximadamente

Além da comprovada economia de energia, deve-se destacar também o aumento da vida útil das mangas e a redução de gastos com ar comprimido para limpeza do filtro de mangas. Esse aumento pode ser estimado em torno de 20%. O equipamento desgastado pode ser observado na Figura 25 (NEVES; LUCA, 2010)



Figura 25 – Filtros mangas com as mangas desgastadas.

Outro resultado satisfatório foi obtido na empresa Alltech do Brasil, em São Pedro do Ivaí, Paraná, uma das maiores fabricantes de nutrição animal do mundo. Os motores usados no seu sistema de exaustão eram os motores de indução *standard* de 250 CV e 400 CV, operando no processamento dos produtos A e B. Os resultados da alteração do sistema de exaustão estão descritos nas Tabelas 2 e 3 (WEG, 2013).

Tabela 2 - Resultado para o sistema de axaustão com o motor de 250 CV.

Indicadores	Motor de indução <i>Standard</i>	Sistema <i>Wmagnet</i>	
		Produto A	Produto B
Custo unitário do KWh	0,26146	0,26146	0,26146
Horas de operação do motor/ano	6,48	6,48	6,48
KWh médio consumido	185	95,25	109,27
Consumo anual (KWh)	1.198.800	617.220	708.069,60
Redução de energia elétrica, em %	-	48,5	40,9
Retorno do investimento	-	6 meses	10 meses

Tabela 3 - Resultado para o sistema de axaustão com o motor de 400 CV.

Indicadores	Motor de indução <i>Standard</i>	Sistema <i>Wmagnet</i>	
		Produto A	Produto B
Custo unitário do KWh	0,26146	0,26146	0,26146
Horas de operação do motor/ano	6,48	6,48	6,48

KWh médio consumido	307,2	134,9	107
Consumo anual (KWh)	1.960.656	874.152	693.360
Redução de energia elétrica, em %	-	55,4	64,6
Retorno do investimento	-	6 meses	8 meses

3.2 Análises na empresa Itatiaia

Quanto às medições realizadas na empresa Itatiaia, ES, foram analisados diversos motores presentes nos sistemas de exaustão, sendo três deles do tipo *Wmagnet* e cinco do tipo *Standard*. Todos eles trabalham durante 19 horas por dia, 26 dias ao longo do mês. A Tabela 4 apresenta os valores de potência média obtidos para cada um deles, durante um dia de medição.

Tabela 4 – Potência média consumida pelos motores do sistema de exaustão da empresa Itatiaia.

Tipo de motor	Potência nominal (CV)	Potência média obtida (KW)	Rendimento do motor
<i>Wmagnet</i>	50	19,2	95,2
<i>Standard</i>	60	38,08	93
<i>Wmagnet</i>	100	48,8	95,3
<i>Standard</i>	100	69,64	93,2
<i>Standard</i>	100	69,21	94,4
<i>Standard</i>	100	60,28	94,1

<i>Standard</i>	60	39,16	93
<i>Wmagnet</i>	60	14,9	92,4

Considerando-se que o valor do KW/h pago pela indústria é de R\$ 0,54, o gasto mensal aproximado de cada motor pode ser calculado pela Equação 6 (WEG, [2013]). Os resultados estão contidos na Tabela 5.

$$\text{Consumo(R\$)} = \frac{\text{Potencia (KW)} * \text{Horas Trabalhadas} * \text{Dias Trabalhados} * \text{Custo KW/h}}{\text{Rendimento do motor}} \quad (6)$$

Tabela 5 - Valor mensal referente a cada motor.

Tipo de motor	Potência nominal (CV)	Valor mensal
<i>Wmagnet</i>	50	R\$ 5.121,79
<i>Standard</i>	60	R\$ 10.158,22
<i>Wmagnet</i>	100	R\$ 12.937,86
<i>Standard 1</i>	100	R\$ 18.462,46
<i>Standard 2</i>	100	R\$ 16.061,62
<i>Standard 3</i>	100	R\$ 16.080,28
<i>Standard</i>	60	R\$ 10.446,32
<i>Wmagnet</i>	60	R\$ 3.974,72

Comparando-se os gastos referentes à um motor de mesma potência do tipo *Standard* e do tipo *Wmagnet*, verifica-se uma redução nos custos de energia para a mesma aplicação e o mesmo tempo de uso, como por exemplo para 60 CV e 100 CV (análise feita com *Standard 1*), obteve-se uma economia de R\$ 6.471,60 e R\$ 5.524,60 mensais, respectivamente.

Na obtenção desse resultado, foi considerado que o motor opera com seu rendimento nominal durante todo o tempo de medição. Porém, sabe-se que em uma aplicação prática não é o que ocorre, uma vez que o rendimento de um motor normalmente varia com a carga em uso.

Portanto, a análise apresentada acima é aproximada, somente para permitir a comparação em situação nominal dos motores.

Porém, a real economia proporcionada pelo motor *Wmagnet* consiste nas aplicações onde há variação de carga, com o respectivo controle de sua rotação, pois o seu rendimento é alto mesmo para pequenas cargas, e mantêm-se praticamente constante, mesmo com a variação dessa carga. Os motores usuais têm o seu rendimento reduzido com a diminuição da carga. Essa comparação pode ser visualizada na Figura 26.

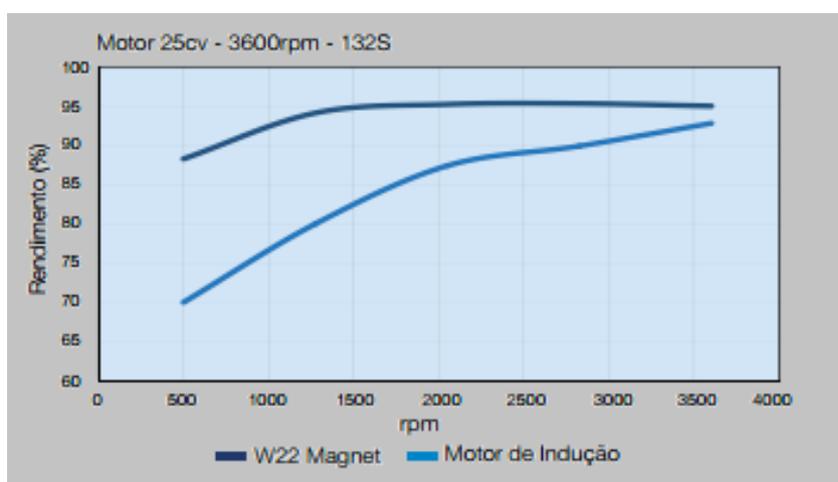


Figura 26 – Curva de rendimento x velocidade do motor *Wmagnet* e de um motor de indução.

3.3 Análises na empresa By Fiapo

Uma parte do sistema de exaustão da empresa By Fiapo, em Juiz de Fora, MG, era composto por dois motores, com as seguintes características:

- Motor de indução trifásico de alto rendimento da marca Voges, 25 CV, Rendimento de 91%, 3540 RPM, 220V.
- Motor W22 *Plus* da Weg, 30 CV, 220V, Rendimento de 92%, 3535 RPM.

O resultado das medições de potência ativa realizadas com os dois motores pode ser encontrado nas Figuras 27 e 28, nos quais obteve-se que a potência ativa média dos motores de 25CV e 30 CV foram de 7,99KW e 16,9 KW, respectivamente.

contendo o inversor e o regulador de pressão, e alguns detalhes de parte do sistema de exaustão dessa empresa. O resultado das medições de potência ativa realizadas com o novo motor pode ser encontrado na Figura 30, na qual verifica-se que a potência ativa média do motor de 75CV é 18,4KW.



Figura 29 – Novo modelo de sistema de exaustão instalado na empresa By Fiapo.

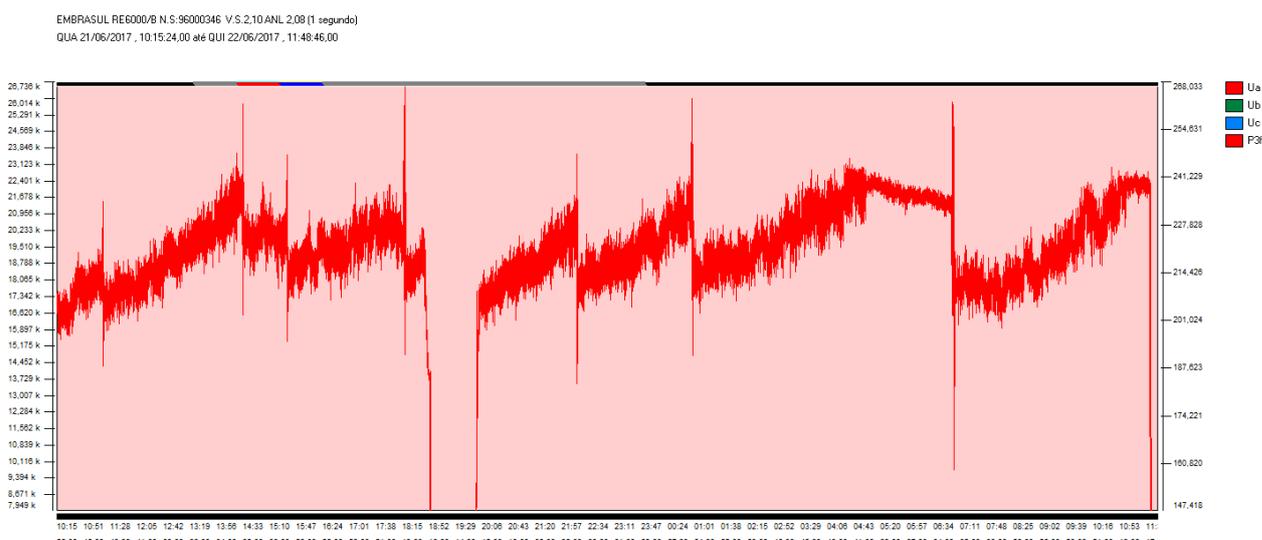


Figura 30 - Potência ativa medida no motor de 75 CV em estudo (Gráfico ampliado no Apêndice A).

Comparando as curvas de potência ativa da Figura 27 e 28 com a da Figura 30, percebe-se nessa última uma maior oscilação de valores medidos pelo motor W_{magnet} , o que corresponde ao controle de velocidade realizado pelo inversor de frequência junto ao regulador de pressão. É essa variação que permite a eficiência do sistema.

Além da questão do rendimento, que está associada a variação de velocidade de rotação e foi abordada no tópico anterior, tem-se também a análise de abertura e fechamento dos dampers. A vazão total do sistema, correspondente a n válvulas abertas, pode ser obtida com o somatório da vazão correspondente a cada válvula, conforme a Equação 7.

$$Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (7)$$

Dessa forma deduzimos que Q_n é maior que Q_{n-1} e, portanto:

$$\frac{Q_n}{Q_{n-1}} = \frac{w_n}{w_{n-1}} > 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{Q_n}{Q_{n-1}}\right)^2 = \left(\frac{w_n}{w_{n-1}}\right)^2 = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{n-1}} > 1 \quad (9)$$

$$\frac{Potência_n}{Potência_{n-1}} = \frac{\Delta P_n * Q_n}{\Delta P_{n-1} * Q_{n-1}} = \left(\frac{w_n}{w_{n-1}}\right)^3 > 1 \quad (10)$$

Dessa forma, pode-se afirmar que $\Delta P_n > \Delta P_{n-1}$ e $Potência_n > Potência_{n-1}$, ou seja, a cada vez que uma válvula é fechada, a pressão e sobretudo, a potência, diminuem. Esse é o grande interesse do sistema, uma vez que a potência consumida reduz em uma relação de proporção ao cubo em comparação com a redução da velocidade de rotação do exaustor. É importante salientar que uma velocidade mínima de funcionamento deve ser calculada e configurada nos parâmetros do inversor de frequência a fim de garantir o bom funcionamento do sistema de exaustão quando todas as válvulas estão fechadas.

Análise do custo-benefício

Considerando-se a potência ativa média obtida, o valor do KW/h da empresa de R\$0,48 e que o motor opera durante 24 horas por dia, 6 dias na semana (26 dias ao mês e 312 dias ao ano) os gastos referentes aos três motores podem ser calculados com auxílio da Equação 6 e estão apresentados na Tabela 6. Além disso, pode-se observar que com os dois motores, a potência média total consumida foi de 24,89 KW e com o novo motor, que é mais potente, o consumo foi menor: 18,4KW.

Tabela 6 - Resultado para o sistema de exaustão da empresa By Fiapo.

Indicadores	Motor de indução Voges	Motor <i>W22 Plus</i> Weg	<i>W22 Magnet Super</i> <i>Premium</i>
Potência do motor	25 CV	30 CV	75 CV
Potência média consumida (KW)	7,99	16,9	18,4
Rendimento nominal (%)	91	92	96,4
Consumo mensal (KW)	4.985,75	10.545,59	11.529,13
Consumo mensal (R\$)	2.393,16	5.061,88	5.534,13
Consumo total (R\$)	7.455,04		5.534,13

Por esse cálculo aproximado, pode-se afirmar que houve uma economia de 23.050,92 reais para a empresa ou de 48.022,8 KW anuais. Quanto ao retorno do investimento, tem-se que o custo total com a compra dos equipamentos, mão de obra e instalação será de aproximadamente R\$ 70.000,00 e que os ganhos representam uma economia de R\$ 23.050,92 ao ano. Em uma situação de análise ideal, considerando-se o rendimento e a carga em cada instante das medições, sabe-se que essa economia será ainda maior. Logo, pode-se calcular o *payback*, segundo a Equação 11 (COLVARA; SALVADOR, 2014).

$$PB = \frac{\text{Investimentos}}{\text{Ganhos}} \quad (11)$$

Portanto, o retorno desse investimento virá, no pior dos casos, em 3 anos para o cliente.

Existem ainda alguns benefícios indiretos referentes à troca do sistema. O primeiro é a redução nos valores da corrente após a troca, o que permite o uso de fios com uma seção menor. Quando se fala em grandes sistemas industriais, com motores de grande potência, uma redução na bitola dos fios pode ter uma implicação financeira significativa. As Figuras 31 e 32 mostram as medições de corrente da fase A obtidas com os motores de 25 e 30 CV, cuja média total é de 95,88 A. Já a Figura 33 mostra as medições de corrente para o motor de 75 CV, cuja média é 51,305 A, um resultado bem menor que o anterior.

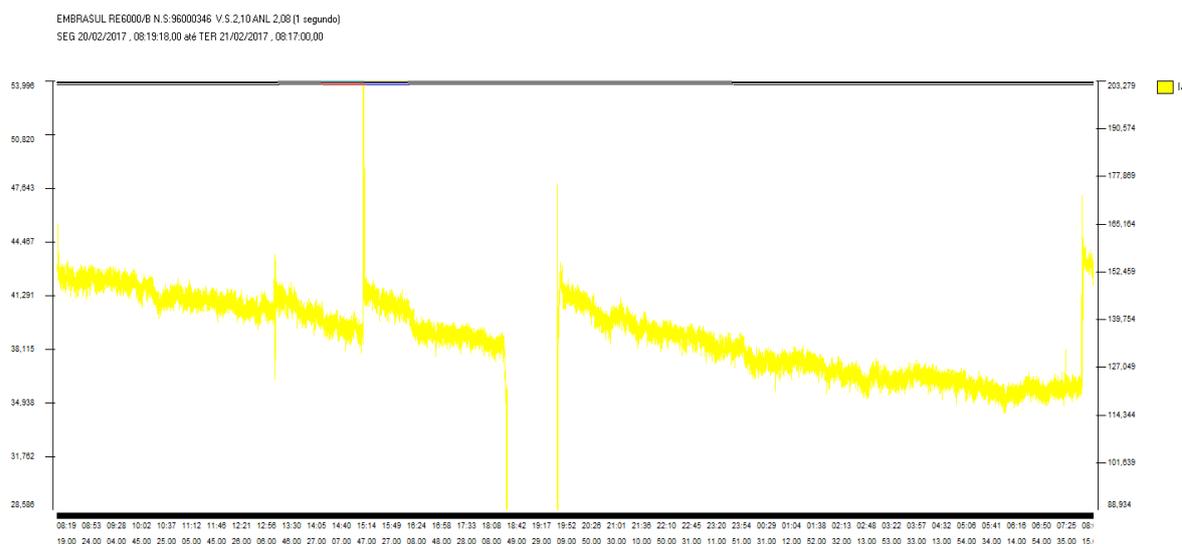


Figura 31 – Medição de corrente para a fase A do motor de 25 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).

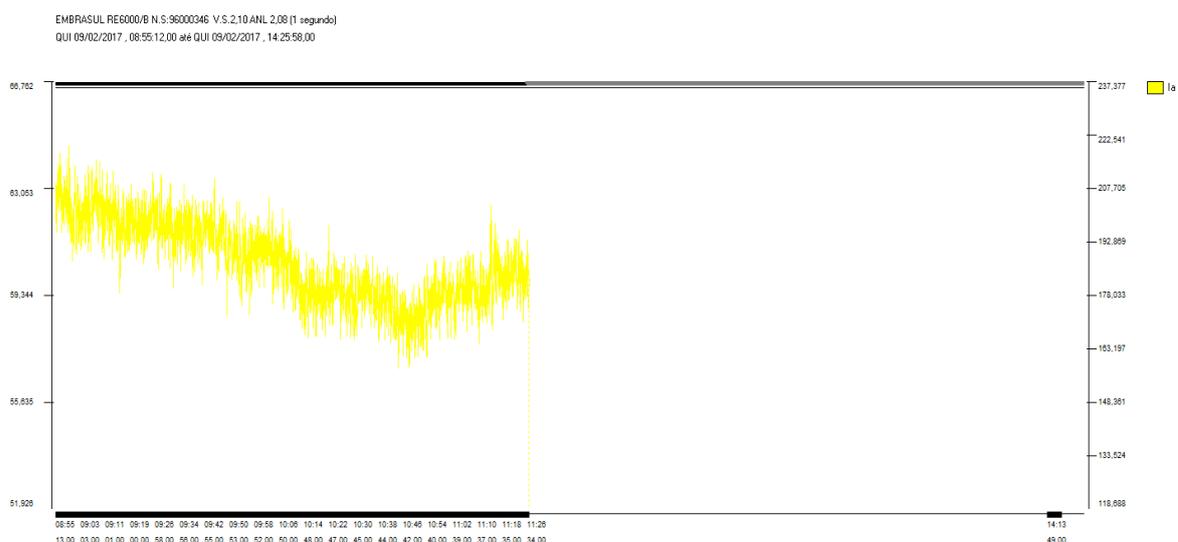


Figura 32 - Medição de corrente para a fase A do motor de 30 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).

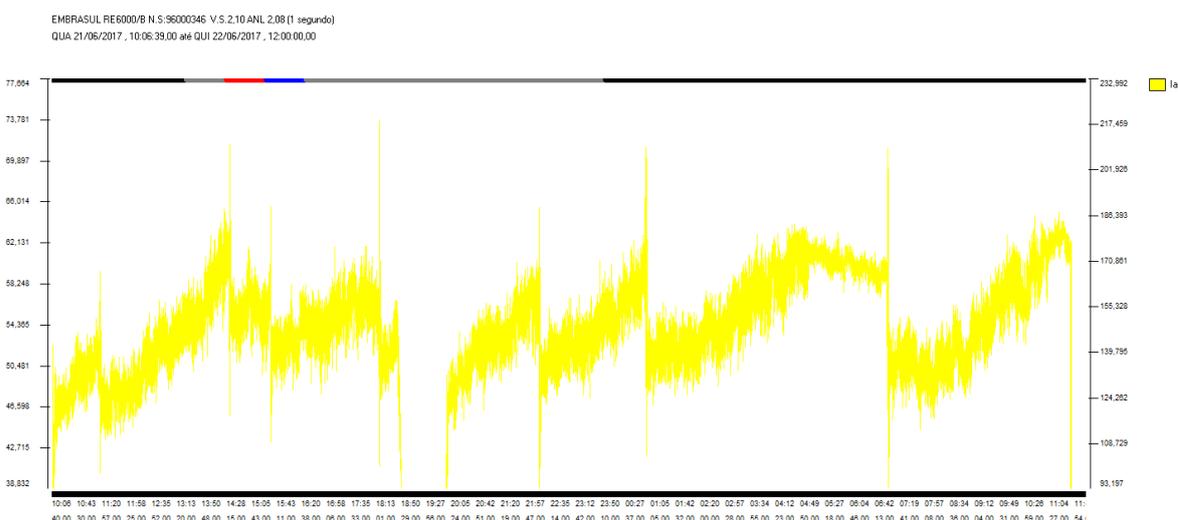


Figura 33 - Medição de corrente para a fase A do motor de 75 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).

A segunda análise a ser feita é referente ao fator de potência. O inversor de frequência usado no sistema de exaustão proposto possui um banco de capacitores próprio capaz de corrigir o fator de potência, mantendo-o dentro do valor esperado de 0,92. As Figuras 34 e 35 representam as curvas de medição dos fatores de potência com os motores de 30 e 75 CV, respectivamente. Observa-se que para o motor usual e o *Wmagnet*, o fator de potência foi de 0,786 e 0,942, respectivamente, promovendo outra economia com o modelo proposto pelo trabalho.

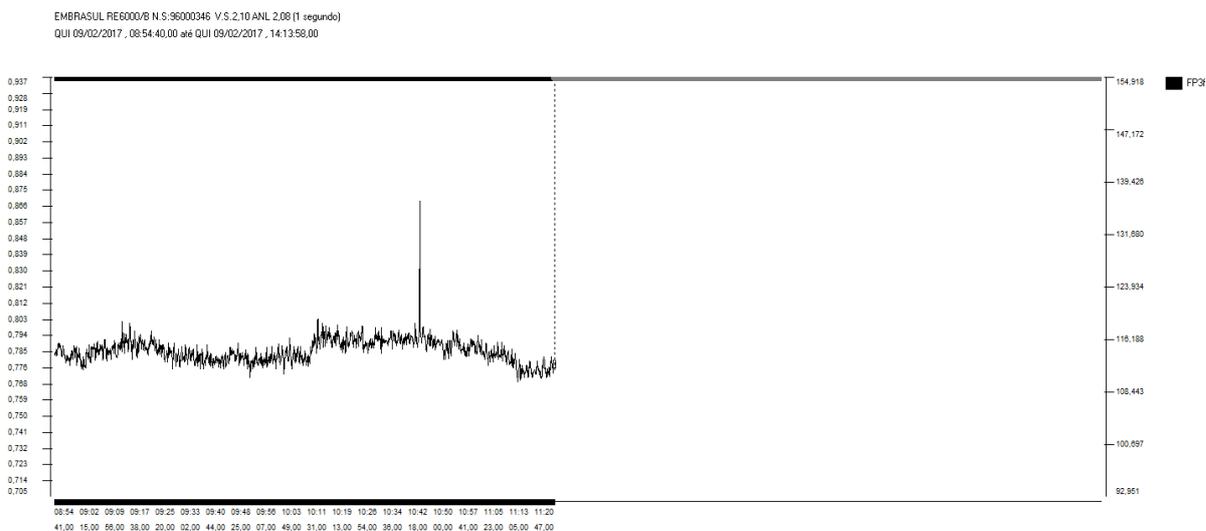


Figura 34 - Curva de medição do fator de potência para o motor de 30 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).

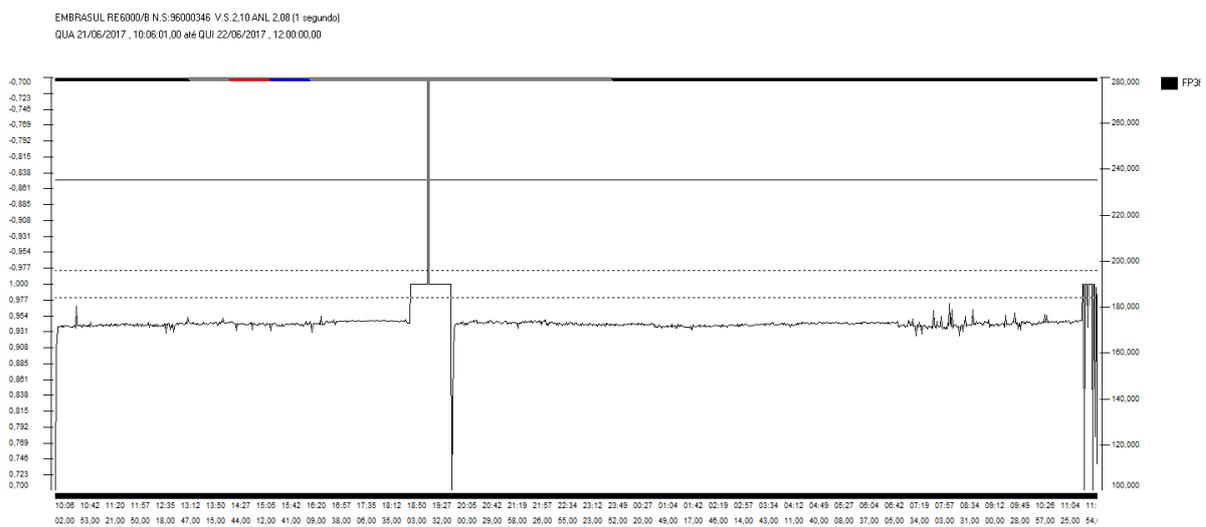


Figura 35 - Curva de medição do fator de potência para o motor de 75 CV (Gráfico ampliado no Apêndice A).

4 *Conclusão*

Para que o sistema *Wmagnet* tenha uma eficiência maior, é necessária a instalação de *dampers* nas entradas do sistema de exaustão, pois assim quando houver uma variação de pressão na tubulação devido a abertura ou fechamento de uma ou mais entradas, a velocidade do motor irá variar alterando sua potência de acordo com o nível de necessidade do sistema, evitando o gasto desnecessário de energia.

A velocidade de rotação do exaustor apresenta proporcionalidade ao cubo em relação à potência ativa utilizada pelo sistema de exaustão, o que significa que qualquer variação nessa grandeza permite uma variação ao cubo da potência. Essa é a explicação para a grande diminuição do gasto de energia com esse modelo, uma vez que ao fechar um *damper*, haverá uma redução exponencial da potência e, conseqüentemente, da energia.

Existem outros benefícios indiretos do modelo e que também reduzem os gastos do consumidor, como a possibilidade de redução da seção mínima dos fios e cabos usados na instalação do sistema de exaustão, a correção do fator de potência, maior confiabilidade do sistema, o menor espaço necessário para instalação do mesmo, entre outros, que são importantes para o sistema e influenciam positivamente na sua eficiência energética.

Este trabalho apresenta uma excelente relação custo-benefício para o consumidor e a aplicabilidade do método no setor industrial.

Para trabalhos futuros, é interessante verificar a influência de outros parâmetros no sistema, como as harmônicas, devido à presença do inversor de frequência.

Referências Bibliográficas

ABESCO. **No Title**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

ANEEL. **LEI Nº 10.295, DE 17 DE OUTUBRO DE 2001**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei200110295.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

ANEEL. **Programa de eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

AUTEL. **Pressure Gauges - DPF 20 REG**. Disponível em: <<http://www.aeautel.it/mpdf/pdf/?sezione=1&col=2&id=290&mc=4&lang=en>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

CHAPMAN, C.; STEPHEN, J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [s.l: s.n.]. v. 5

COLVARA, C. M. G.; SALVADOR, C. A. V. **Análise de redução no consumo de energia elétrica no processo de resfriamento de ração**. 2014.

DORF, R. C. **Sistemas De Controle Modernos**. [s.l: s.n.].

ELETROBRÁS. **Ventiladores e Exaustores: guia básico**. 2008.

EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA. **Analizador de Energia RE6000**. p. 9, 2015.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2017.

GUARDIA, E. et al. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: uma visão institucional**. [s.l: s.n.].

INATOMI, T. A. H. **Análise da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso em ambiente de escritório, na cidade de são paulo, utilizando o modelo computacional**. 2008.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. [s.l: s.n.]. v. 2

NEVES, R. A.; LUCA, H. P. **Eficiência energética com aplicação de motores de ímãs permanentes**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-enie-eficiencia-energetica-com-aplicacao-de-motores-de-imas-permanentes-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2017.

POMPERMAYER, M. L. (ANEEL). **Indústria mais eficiente**. Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-industria-+-eficiente-estudo-de-caso-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 2012.

WEG. **No Title**. Disponível em: <<http://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/industrial-applications>>. Acesso em: 23 jun. 2017a.

WEG. **Gestão eficiente da energia elétrica**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2017b.

WEG. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência**. Disponível em: <<http://sidrasul.com.br/wp-content/uploads/2014/09/Guia-de-Aplicação-de-Inversores-de-Frequência-WEG-3ª-Edição.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

WEG. **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência**. 2007.

WEG. **Eficiência Energética em Filtros de Manga**. Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-eficiencia-energetica-em-filtros-de-manga-wmo014-estudo-de-caso-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

WEG. **Case de Eficiência Energética em Sistemas de Exaustão**. Disponível em:

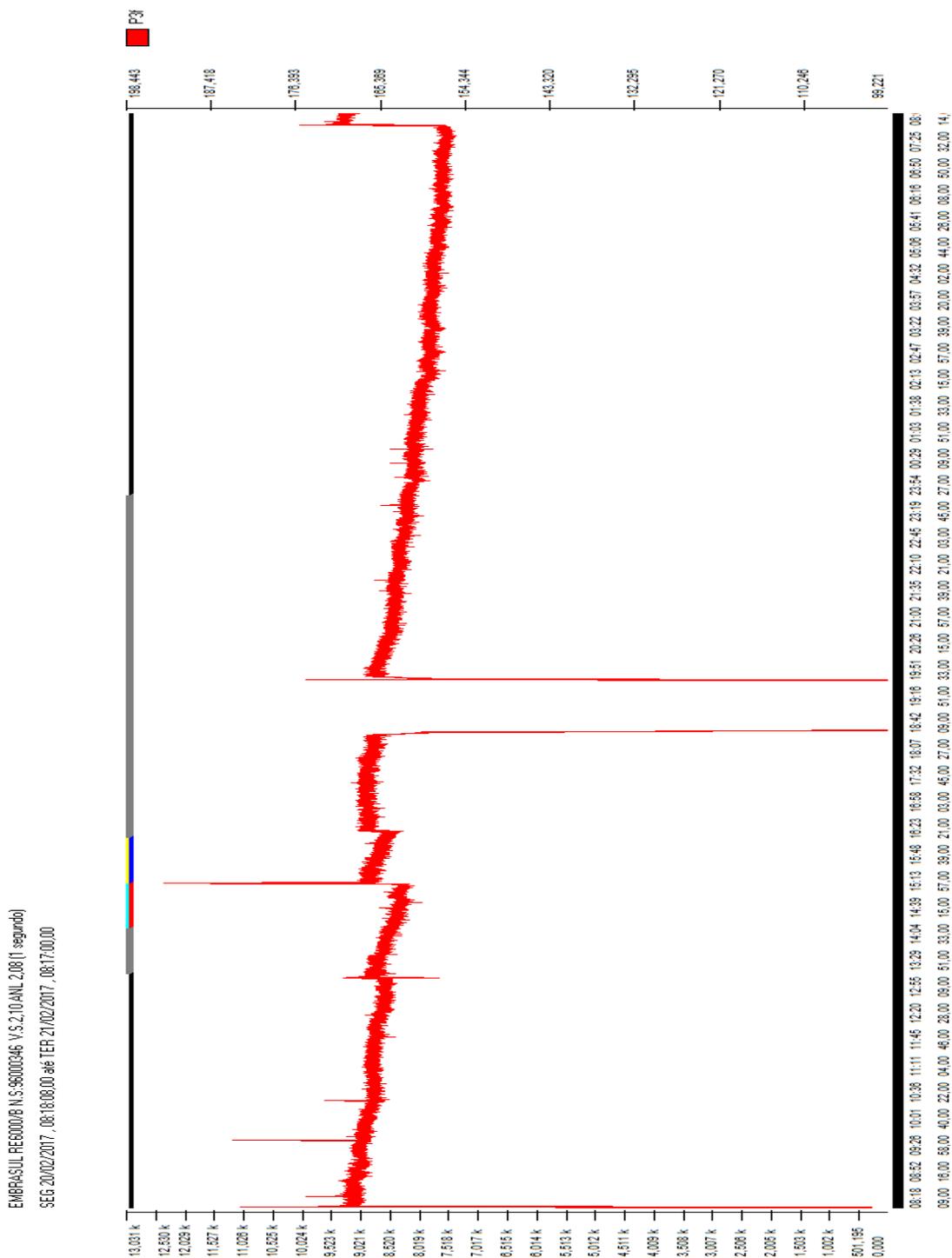
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-eficiencia-energetica-em-sistemas-de-exaustao-alltech-do-brasil-estudo-de-caso-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

WEG. **Inversor de Frequência CFW-11**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-completo-10510201-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

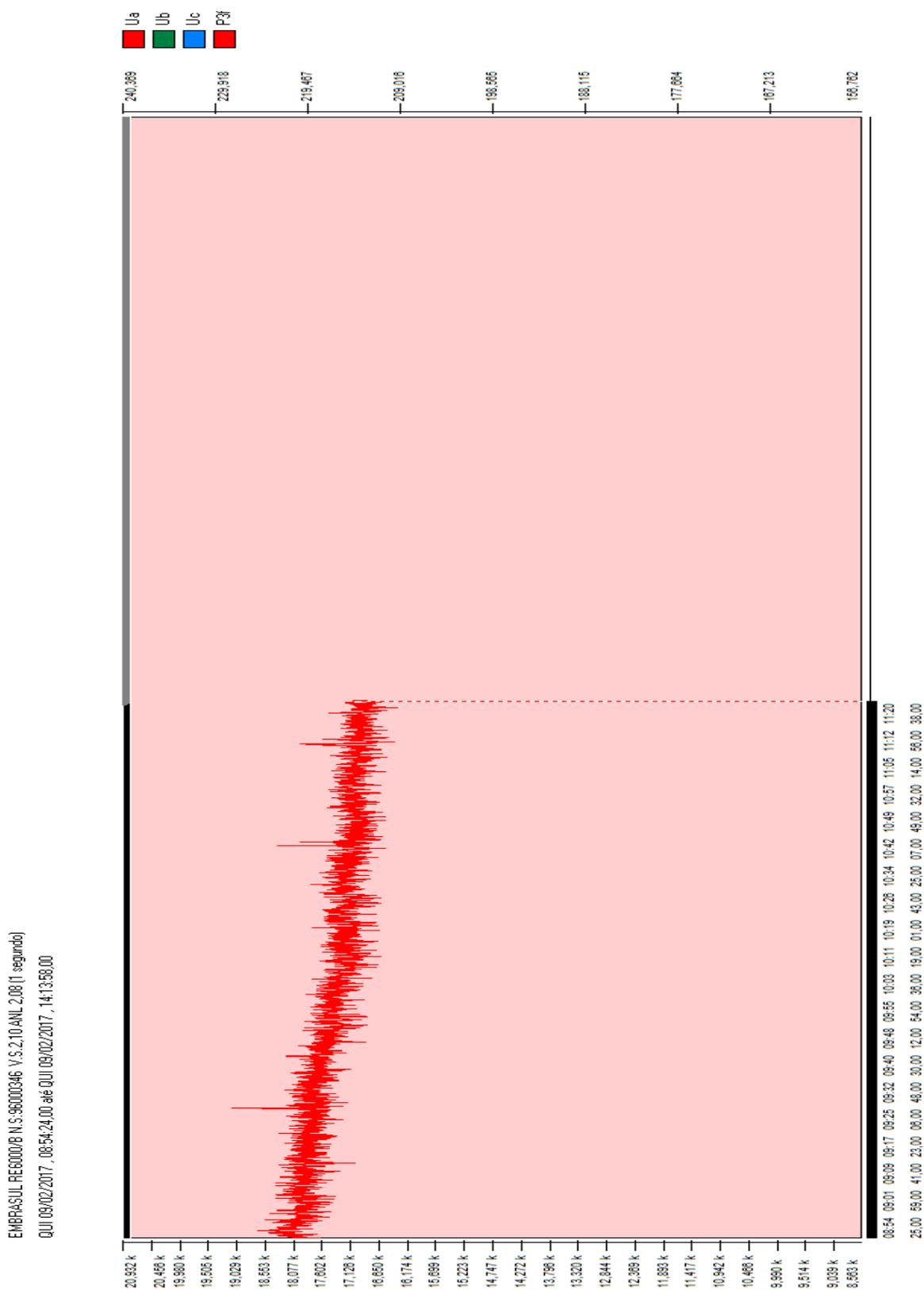
WEG. **Características, Especificação e Dimensionamento de Motores Elétricos CA de Baixa Tensão**. [s.l.: s.n.].

Apêndice A – Gráficos de medições ampliados

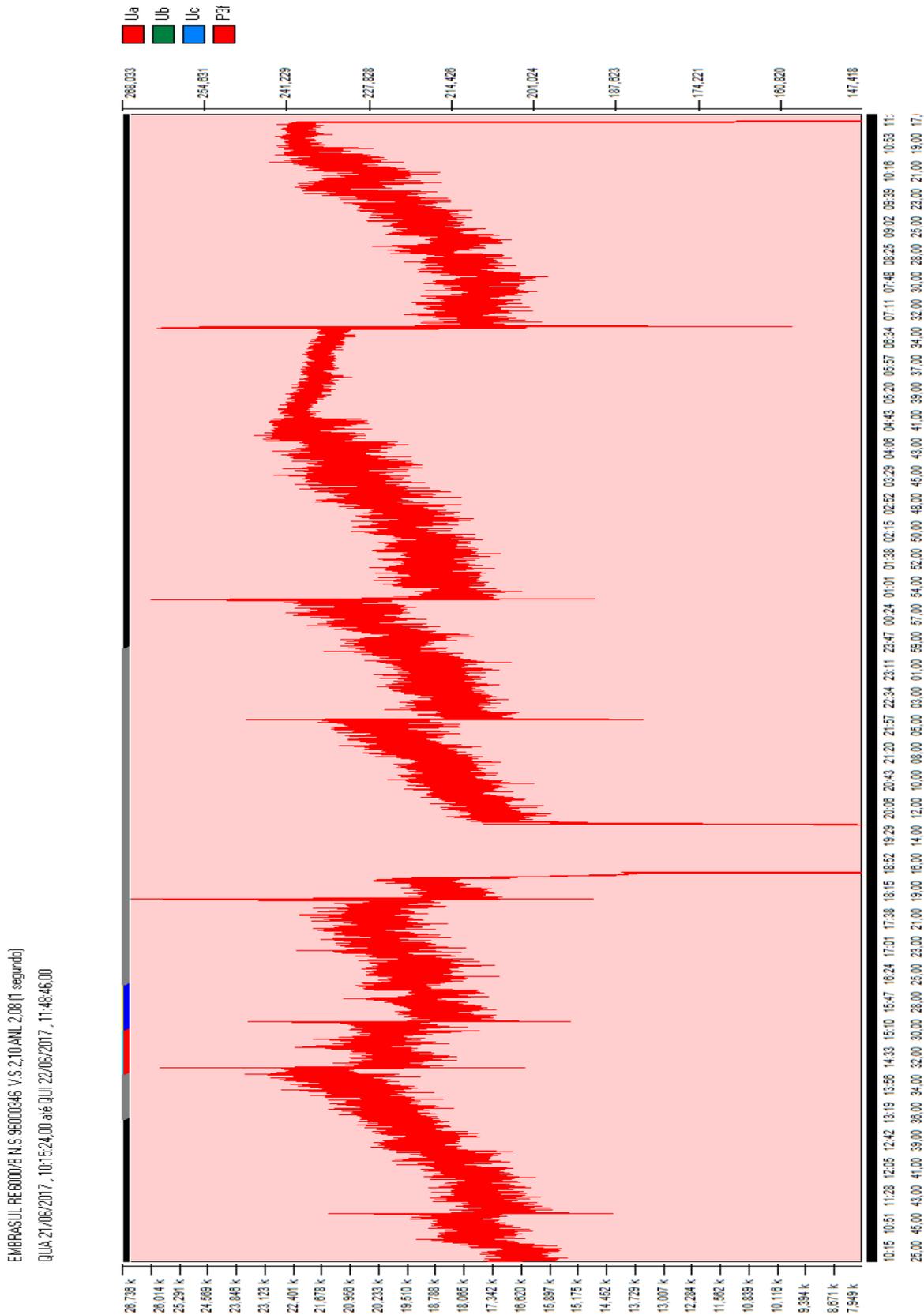
1. Potência ativa medida no motor de 25 CV em estudo.



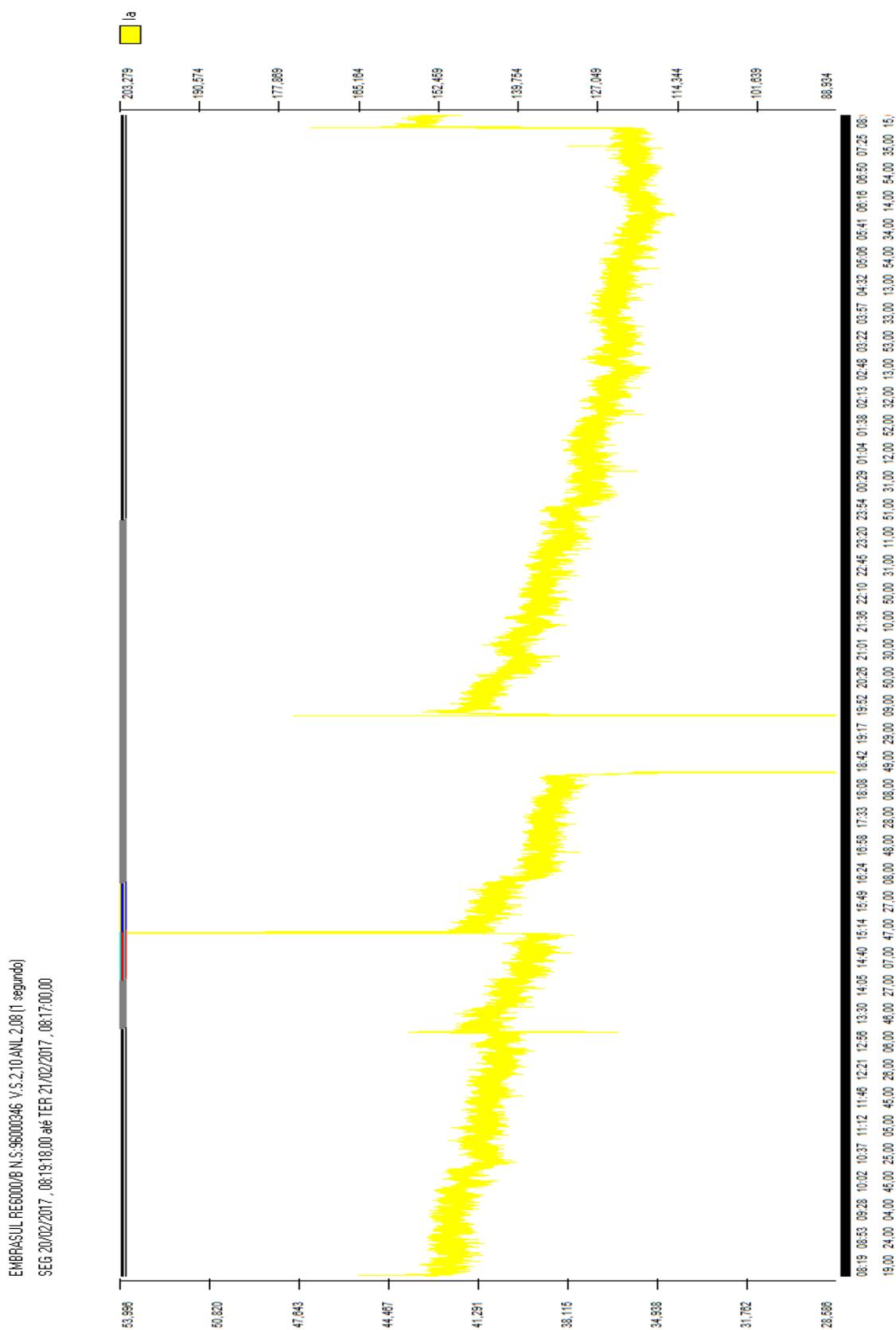
2. Potência ativa medida no motor de 30 CV em estudo.



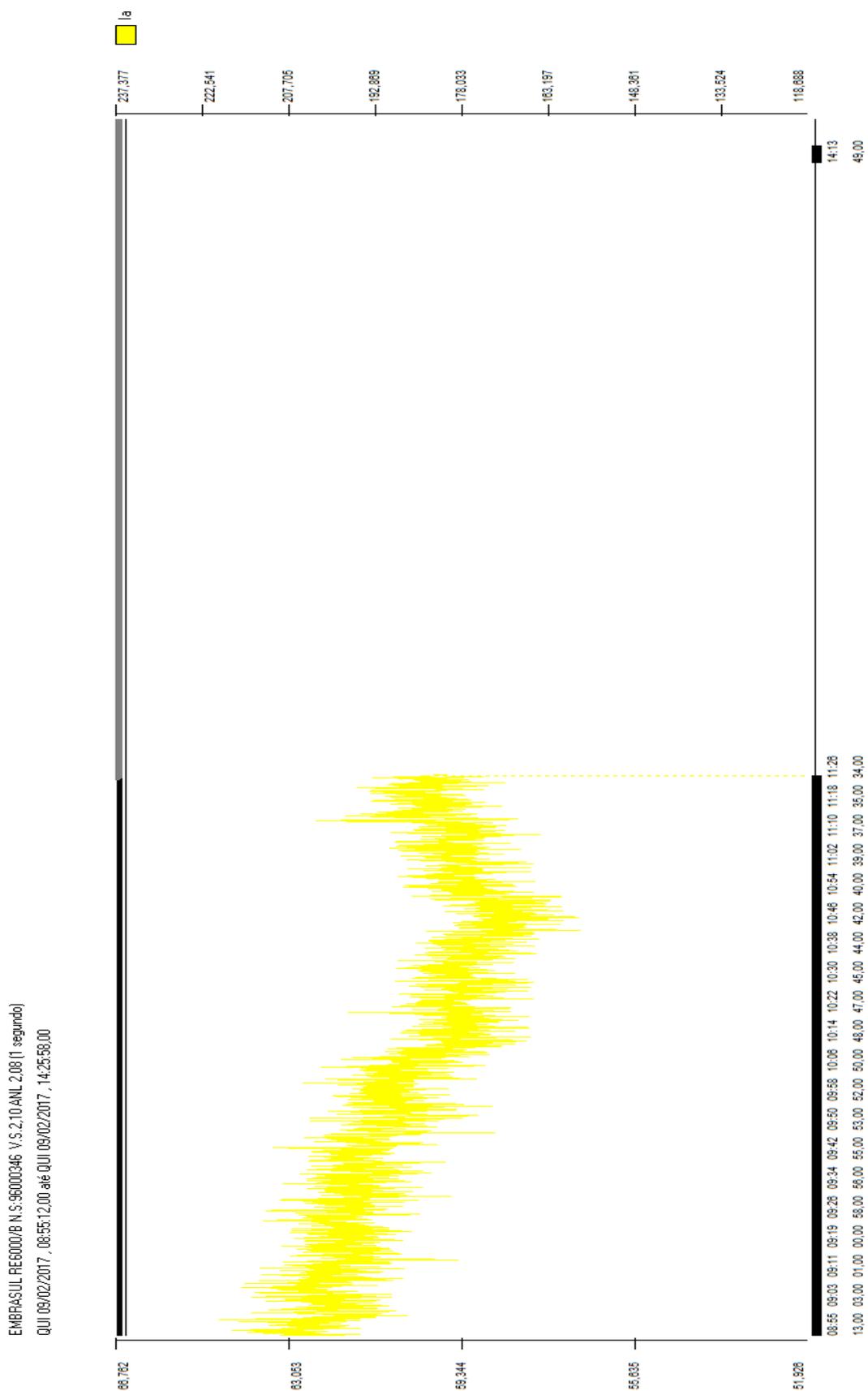
3. Potência ativa medida no motor de 75 CV em estudo.



4. Corrente medida no motor de 25CV em estudo.



5. Corrente medida no motor de 30CV em estudo.



7. Fator de potência do motor de 30CV em estudo.

