

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOÃO GABRIEL RODRIGUES RIBAS

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM ÊNFASE NA UTILIZAÇÃO DE
MOTOR ELÉTRICO COM ALTO RENDIMENTO EM UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO NA INDÚSTRIA**

**CURITIBA
2018**

JOÃO GABRIEL RODRIGUES RIBAS

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM ÊNFASE NA UTILIZAÇÃO DE
MOTOR ELÉTRICO COM ALTO RENDIMENTO EM UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO NA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rogers Demonti.

CURITIBA

2018

JOÃO GABRIEL RODRIGUES RIBAS

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM ÊNFASE NA UTILIZAÇÃO DE
MOTORES ELÉTRICOS COM ALTO RENDIMENTO EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Orientador:

Professor Dr. Rogers Demonti
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Professor Dr. Carlos Gouvea
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Professor Dr. Carlos Gabriel Bianchin
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 26 de junho de 2018.

Dedico esse trabalho primeiramente à
minha família pelo suporte dado durante
esse período.
Também dedico a todas as pessoas que
me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram durante a construção desse trabalho, obrigado pela paciência e por todo o suporte.

Agradeço à minha família, principalmente aos meus pais Roderlei e Josiane.

Agradeço ao meu professor orientador Rogers pelo apoio.

Agradeço aos meus amigos que passaram por tudo comigo.

Agradeço à Camila Vicentin, que sempre esteve e sempre estará por perto.

RESUMO

O trabalho desenvolvido tem como objetivo apresentar um estudo de eficiência energética focando na utilização de motor elétrico em torres de resfriamento em uma indústria. Para tanto, a análise contempla o consumo de energia elétrica a partir da utilização de motores elétricos trifásicos. Visando a redução de consumo de energia na indústria, foi realizado um estudo que propõe uma solução direcionada a economia de energia elétrica no sistema de resfriamento de água. A utilização do inversor de frequência permite a variação de velocidade do motor para que os ventiladores rotacionem na velocidade necessária para o resfriamento da água, sem desperdício. O transdutor de temperatura tem como objetivo enviar um sinal analógico para o inversor, possibilitando o controle de velocidade automático. Considerando os custos de aquisição de um motor novo, bem como do sistema de acionamento por inversor de frequência, e a economia de energia em um dado período de tempo, estabelece-se o tempo de payback e a viabilidade do projeto.

Palavras-chave: Eficiência energética. Payback. Motores. Consumo. Inversor. Velocidade

ABSTRACT

The paper developed aims to conduct an energy efficiency study focusing on the use of electric motor in cooling towers in an industry. For this, the analysis contemplates the consumption of electrical energy from the use of three-phase electric motors. Aiming at the reduction of energy consumption in the industry, a study was carried out proposing a solution aimed at saving electric energy in the water cooling system. The use of the frequency inverter allows the speed variation of the motor so that the fans rotate at the speed necessary for the cooling of the water, without wasting. The temperature transducer aims to send an analog signal to the inverter, allowing automatic speed control. Considering the costs of acquiring a new motor, as well as the drive system by frequency inverter, and saving energy in a given period of time, the payback time and feasibility of the project is established.

Key-words: Energy efficiency. Payback time. Electric motors. Consumption. Inverter. Speed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Selo PROCEL	13
Figura 2 - Tipos de motores elétricos	20
Figura 3 - Motor elétrico – características construtivas	21
Figura 4 - Placa de identificação de um motor de 15 cv.....	22
Figura 5 - Triângulo de potências.....	34
Figura 6 - Inversor de frequência CFW300	35
Figura 7 – Funcionamento do inversor de frequência PWM	36
Figura 8 – Esquema de funcionamento do termopar	40
Figura 9 - Alimentação do transdutor	41
Figura 10 – Conexão do transdutor ao inversor de frequência.....	41
Figura 11 - Torre de resfriamento.....	42
Figura 12 - Dados da tarifa de energia.....	44
Figura 13 – Fotografia da placa do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv	45
Figura 14 - Dados de placa do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv.....	46
Figura 15 - Motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv.....	47
Figura 16 - Dados do motor IR2 Plus de 7,5 cv.....	48
Figura 17 - Detalhes Técnicos do motor atual.....	49
Figura 18 - Dados da torre de resfriamento.....	50
Figura 19 - Cálculo de frequência média.....	51
Figura 20 - Método de partida	51
Figura 21 - Acoplamento entre motor e ventilador	52
Figura 22 - Detalhes do Regime de serviço do motor	52
Figura 23 - Redimensionamento do motor elétrico.....	53
Figura 24 - Desempenho do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv	54
Figura 25 - Características do W22 Premium IR3 de 7,5 cv	58
Figura 26 - Motor W22 IR3 Premium de 7,5 cv	59
Figura 27 - Resultados apresentados pelo software	65
Figura 28 - Análise financeira.....	69
Figura 29 - Inversor de frequência CFW500 para motor de 7,5 cv.....	70
Figura 30 - Características técnicas do CFW500 para motor de 7,5 cv	71
Figura 31 - Especificações técnicas do inversor CFW500 para motor de 7,5 cv.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimentos mínimos para motores padrão e de alto rendimento	14
Tabela 2 - Rendimentos mínimos para motores de alto rendimento	15
Tabela 3 – Tipos de cargas em relação ao fator de potência.....	34
Tabela 4 – Características conforme porcentagem de carga do motor IR3 Premium de 7,5 cv.....	63
Tabela 5 - Relação dos custos de cada componente do sistema proposto	67
Tabela 6 - Parâmetros para o PID.....	72
Tabela 7 - Valores para os ganhos do PID.....	73
Tabela 8 - Comparação de consumo e custos entre os motores	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de energia por setor no Brasil	13
Gráfico 2 - Comparativo de rendimento e potência entre os motores IR1, IR2 e IR3	16
Gráfico 3 - Conjugado x velocidade	24
Gráfico 4 - Conjugado x velocidade (categorias).....	26
Gráfico 5 - Conjugado de carga constante	28
Gráfico 6 - Conjugado de carga linear.....	28
Gráfico 7 - Conjugado de carga quadrático.....	29
Gráfico 8 - Conjugado de carga hiperbólico	29
Gráfico 9 - Tensão x frequência	38
Gráfico 10 - Torque x frequência.....	38
Gráfico 11 – Potência x frequência	39
Gráfico 12 - Curvas de desempenho motor IR2 Plus de 7,5 cv.....	55
Gráfico 13 - Curvas de conjugado e corrente do motor IR2 de 7,5 cv.....	56
Gráfico 14 - Curvas de desempenho do motor IR3 Premium de 7,5 cv	60
Gráfico 15 - Curvas de conjugado e corrente do motor IR3 Premium de 7,5 cv	61
Gráfico 16 - Curvas de operação com inversor de frequência do motor IR3 Premium de 7,5 cv.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI1	<i>Analog Input one</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEE	Central de Eficiência Energética
DC	<i>Direct Current</i>
DI1	<i>Digital Input one</i>
DI3	<i>Digital Input three</i>
ICMS	Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem-máquina
In	Corrente Nominal
IR1	Índice de Rendimento Um
IR2	Índice de Rendimento Dois
IR3	Índice de Rendimento Três
IR4	Índice de Rendimento Quatro
IR5	Índice de rendimento Cinco
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
rpm	Rotações por Minuto
S.I.	Sistema Internacional de grandezas
TEMP.	Temperatura
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
2	MATERIAIS E MÉTODOS	19
2.1	O MOTOR ELÉTRICO.....	19
2.1.1	Características do Motor Elétrico.....	21
2.1.1.1	Velocidade do motor elétrico	22
2.1.1.2	Conjugado do motor elétrico.....	24
2.1.1.3	Categorias do conjugado.....	26
2.1.1.4	Conjugado da carga	27
2.1.1.5	Rendimento do motor elétrico.....	29
2.1.1.6	Perdas no motor elétrico.....	32
2.1.1.7	Fator de potência.....	33
2.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	35
2.2.1	Variação da Velocidade.....	37
2.3	TRANSDUTOR DE TEMPERATURA.....	40
2.4	TORRE DE RESFRIAMENTO.....	42
2.5	METODOLOGIA	43
3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
3.1	SOFTWARE CEE	44
3.1.1	Dados da planta industrial.....	44
3.1.2	Motor Elétrico W22 IR2 Plus	45
3.1.3	Cálculo da Frequência Média de Operação.....	49
3.1.4	Detalhes de Regime do Motor Elétrico	52
3.1.5	Cálculo de Demanda e Consumo do Motor W22 IR2 Plus	54
3.1.6	Motor Elétrico W22 IR3 Premium	58
3.1.7	Cálculo da Demanda e Consumo do Motor W22 IR3 Premium.....	63
3.1.8	Cálculo de Demanda e Consumo com Inversor de Frequência	64
3.1.9	Investimentos.....	67

3.1.10	Cálculo do Payback.....	68
3.2	INVERSOR CFW500.....	70
3.2.1	Parametrização do Inversor de Frequência	72
4	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

No início do século XXI, o Brasil viveu uma grande crise energética conhecida como “O Apagão” (O GLOBO, 2013). Devido à falta de investimentos nos setores de geração, transmissão e distribuição, além dos longos períodos de estiagem, o fornecimento de eletricidade no Brasil estava para entrar em colapso. O crescimento populacional e o aumento da produção nas indústrias exigiam cada vez mais geração de energia elétrica. Nessa época, 90% das usinas geradoras eram hidrelétricas, então o período de secas foi desastroso para a geração de energia, devido ao fato de que os níveis dos reservatórios das usinas mantinham-se baixos (PINTO, T. dos S., 200-?). A falta de linhas de transmissão também era um empecilho para transportar a energia produzida de onde havia sobra para onde faltava (O GLOBO, 2013).

O então Presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, tomou medidas para forçar a racionalização de energia no país. Toda residência que consumisse mais de 100 quilowatts/hora por mês, deveria reduzir em 20% seu consumo, caso contrário a luz seria cortada na residência em questão (PINTO, T. dos S., 200-?).

Além da redução obrigatória do consumo de energia, outras soluções tornaram-se promissoras. O investimento no setor de geração e transmissão intensificou-se, a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes e de LED começou a ganhar força e, na indústria, a substituição de motores antigos de rendimentos menores por motores novos de rendimentos maiores tornou-se uma questão interessante. Em dezembro de 2002, o Presidente da República Fernando Henrique Cardoso assinou o Decreto Federal 4.508 que estipulava valores mínimos de rendimento para motores elétricos (PLANALTO, 2002).

A definição de eficiência energética é a ação de consumir energia de um modo eficiente com o mínimo de desperdício possível (ABESCO, 2015). Em 1985 foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, o qual tem como objetivo incentivar a eficiência energética (PROCEL INFO, 2014). O selo PROCEL é etiquetado anualmente nos aparelhos domésticos que consomem menos energia (PROCEL INFO, 2014). Para que um equipamento receba o selo, o mesmo deve passar por ensaios em laboratórios sugeridos pela Eletrobrás. Caso o equipamento consiga atingir o índice de consumo e desempenho para sua categoria, este será recompensado com o selo PROCEL (PROCEL INFO, 2014).

O selo encontra-se representado na figura 1:

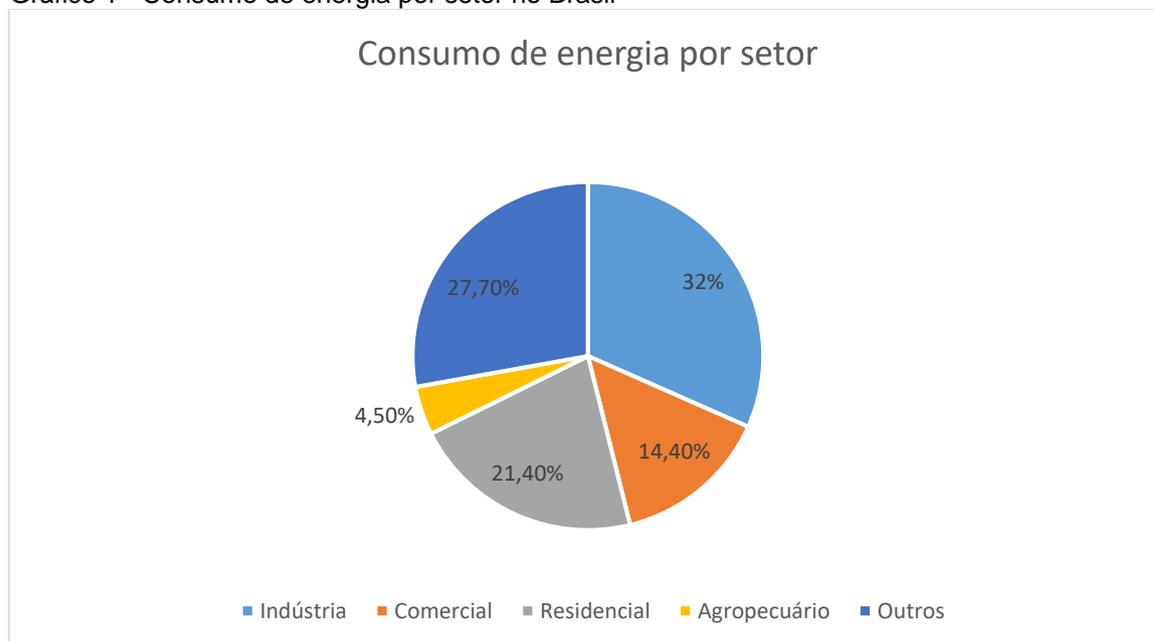
Figura 1 – Selo PROCEL



Fonte: PROCEL INFO, 2006.

O setor com maior consumo de energia elétrica no Brasil é o industrial, com uma parcela de 31,5%, seguido pelo setor residencial que consome 21,4% (BEN, 2017), de acordo com o gráfico 1:

Gráfico 1 - Consumo de energia por setor no Brasil



Fonte: BEN, 2017.

O motor elétrico é o responsável pela maior parcela de consumo de energia na indústria, com 70% do total da parcela de consumo (BEN, 2017).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A preservação do meio-ambiente e o uso eficiente dos recursos energéticos no Brasil começaram a ganhar destaque no início do século XXI (O GLOBO, 2013). Em 17 de Outubro de 2001 foi sancionada a Lei 10.295 – 2001 pelo presidente da república Fernando Henrique Cardoso. Essa lei é também conhecida como Lei da Eficiência Energética e impõe basicamente níveis máximos de consumo de energia em aparelhos e máquinas, ou níveis mínimos de rendimento (PLANALTO, 2001).

Com base na Lei da Eficiência Energética, em 11 de dezembro de 2002 foi imposto o decreto 4.508 – 2002, o qual estabelece valores mínimos para o rendimento de motores elétricos (PLANALTO, 2002). No decreto em questão os motores foram divididos em rendimento padrão e alto rendimento. Pode-se confirmar a eficiência de cada motor de acordo com sua potência e número de polos na tabela 1:

Tabela 1 – Rendimentos mínimos para motores padrão e de alto rendimento

cv ou hp	Kw	PADRÃO				ALTO RENDIMENTO			
		Pólos				Pólos			
		2	4	6	8	2	4	6	8
1,0	0,75	77,0	78,0	73,0	66,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	78,5	79,0	76,0	73,5	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	81,0	81,5	77,0	77,0	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,2	81,5	83,0	78,5	78,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3,0	82,5	83,0	81,0	79,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	84,5	85,0	83,5	80,0	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	85,0	85,5	84,0	82,0	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	86,0	87,0	85,0	84,0	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	87,5	87,5	86,0	85,0	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	87,5	87,5	87,5	86,0	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	87,5	88,5	89,0	87,5	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	88,5	89,5	89,5	88,5	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	89,5	90,5	90,2	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	89,5	91,0	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	90,2	91,7	91,7	90,2	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	91,5	92,4	91,7	91,0	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	91,7	93,0	91,7	91,0	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	92,4	93,0	92,1	91,5	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,0	93,2	93,0	92,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	93,0	93,2	93,0	92,5	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	93,0	93,5	94,1	92,5	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	93,5	94,1	94,1		94,7	95,0	95,0	
200	150	94,1	94,5	94,1		95,0	95,0	95,0	
250	185	94,1	94,5			95,4	95,0		

Fonte: PLANALTO, 2002.

A Portaria 553 – 2005 contempla o desenvolvimento do plano de metas do decreto 4.508 – 2002. Nesse caso, a tabela de rendimentos não considera a divisão entre padrão e alto rendimento (INMETRO, 2005). Pode-se verificar os rendimentos conforme a tabela 2:

Tabela 2 - Rendimentos mínimos para motores de alto rendimento

Potência nominal		Pólos			
cv ou hp	kW	2	4	6	8
1,0	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	
200	150	95,0	95,0	95,0	
250	185	95,4	95,0		

Fonte: INMETRO, 2005.

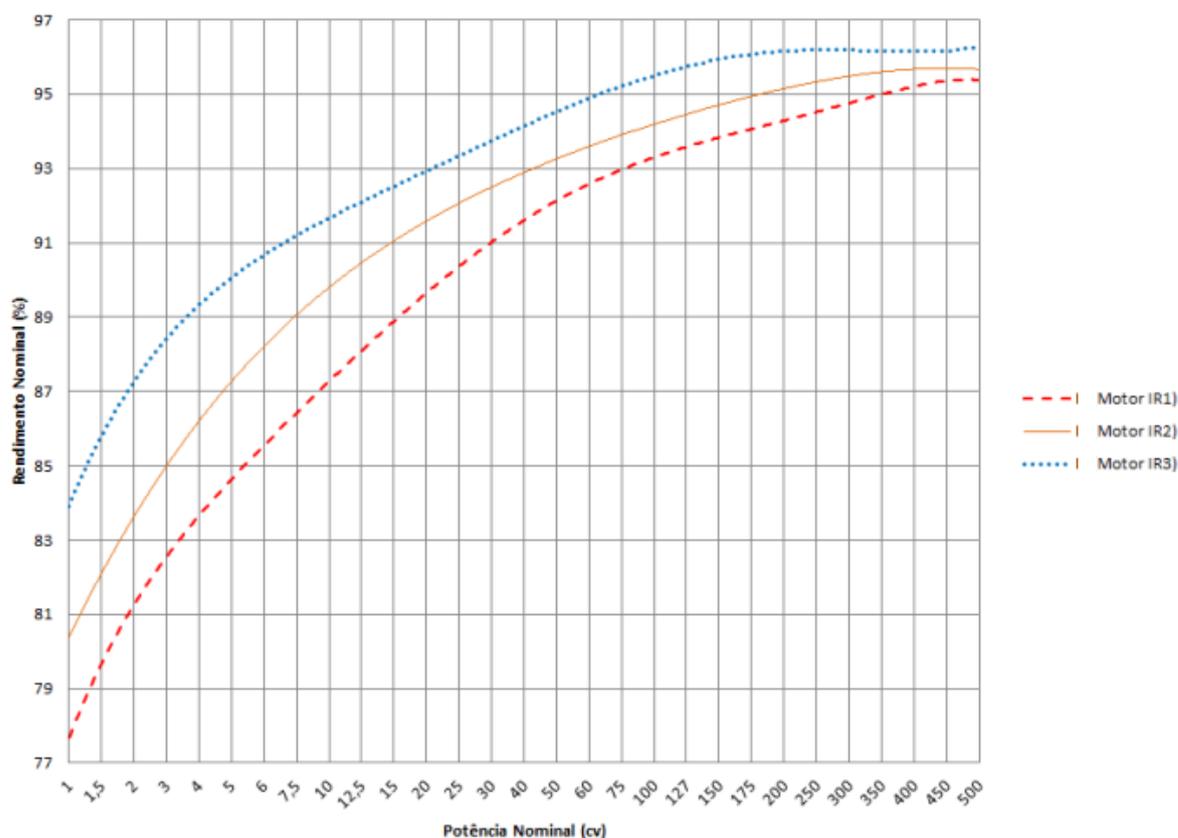
A fabricação de motores que não contemplassem as atribuições da Portaria 553 de 2005 ficou permitida até 4 anos depois da data em que a portaria entrou em vigor, mais especificamente em dezembro de 2009 (INMETRO, 2005). Já a comercialização de motores foi liberada até 4 anos e seis meses após o estabelecimento da portaria, ou seja, junho de 2010 (INMETRO, 2005). Foram atribuídos índices de rendimento que deveriam ser respeitados, os quais são IR1, R2,

IR3, IR4 e IR5. O primeiro nível de rendimento não atende a norma da Portaria 553. O nível mínimo permitido a partir de dezembro de 2009 foi o IR2 (INMETRO, 2005).

No mês de junho de 2017, foi estabelecida a Portaria Interministerial nº1, a qual também definia níveis mínimos de rendimento para motores do tipo gaiola de esquilo. O nível mínimo determinado nessa Portaria foi o IR3 Premium, sendo que a fabricação do motor nível IR2 Plus só poderia ser realizada até junho de 2019, e sua comercialização até dezembro de 2019 (MME, 2017).

O gráfico 2 apresenta um comparativo entre as curvas de rendimento dos motores IR1, IR2 e IR3, para cada valor de potência nominal da máquina:

Gráfico 2 - Comparativo de rendimento e potência entre os motores IR1, IR2 e IR3



Fonte: FERREIRA, C. A. C., 2015.

A solução para os fabricantes de equipamentos e máquinas elétricas, bem como os importadores dos mesmos, foi adequar-se às novas normas da lei. Como a indústria é o setor que consome mais energia elétrica (32%) no Brasil e a força motriz é responsável por 70% do consumo de energia no setor industrial, as novas regras para rendimentos de motores elétricos foram um alívio para as áreas de geração e distribuição de energia (BEN, 2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é realizar um estudo de eficiência energética em uma torre de resfriamento de uma indústria, evitando-se o consumo excessivo de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Utilizar inversor de frequência para variação de velocidade do motor elétrico com o objetivo de obter precisão na rotação;
- b) Utilizar motor elétrico IR3 em substituição de um motor IR2 antigo que consome mais energia e possui rendimento menor;
- c) Implementar programação no inversor de frequência para funcionamento do sistema PID;
- d) Analisar os investimentos necessários para a instalação do processo;
- e) Calcular o tempo de payback do projeto;
- f) Analisar a viabilidade do projeto;

1.3 JUSTIFICATIVA

A razão pela qual foi realizado esse trabalho é principalmente a crescente preocupação com o desperdício de energia. A população brasileira cresce mais a cada ano, e com esta, o número de residências. Para atender a um número cada vez maior

de consumidores e com o objetivo de produzir mais, o setor industrial também cresce anualmente.

A utilização da força motriz na indústria é a atividade responsável pelo maior consumo de energia elétrica no setor, aproximadamente 70% (BEN, 2017). O superdimensionamento de um motor elétrico é uma das razões para o desperdício. A máquina está dimensionada para acionar uma carga que poderia ser acionada com um motor de menor potência. Conseqüentemente, o mau dimensionamento acarreta em um custo maior de aquisição, além do tamanho maior do motor. O fator de potência e o rendimento também serão reduzidos, e uma corrente de partida maior será implementada, acarretando em um custo maior para a proteção do sistema (BORTONI; E.C; SANTOS, 2001).

Um dos casos em que se tem desperdício exagerado de energia elétrica em plantas industriais é a torre de resfriamento. A função desse sistema é resfriar a água que é utilizada em processos industriais. Em um caso em que o motor de um exaustor é acionado por uma partida estrela-triângulo, não há controle de velocidade da máquina. Esse episódio gera desperdício de energia, devido ao fato de que o exaustor não necessita rotacionar em sua velocidade nominal o tempo todo. Certamente, o exaustor precisa girar conforme a temperatura ambiente da torre, com precisão. A temperatura varia ao longo do tempo, então o motor precisa variar a velocidade para manter o ambiente estável e não girar mais e nem menos do que realmente necessita. A solução para esse problema é a utilização de um inversor de frequência que realizará a alteração de velocidade do motor conforme necessário. A utilização de um transdutor de temperatura na torre é imprescindível para enviar um sinal analógico para o inversor de frequência. Conforme o sinal enviado pelo transdutor, o inversor de frequência poderá ajustar a velocidade do motor com precisão para uma certa temperatura, contando com uma programação dos parâmetros e sistema PID.

A variação da velocidade do motor acarreta na redução de potência demandada da rede, tendo em vista que na velocidade nominal do motor em 100% do tempo, a potência demandada é maior. A redução do consumo de energia elétrica é garantida. O custo de aquisição do sistema de solução de eficiência energética é avaliado pela sua viabilidade, e então pode-se calcular o payback do projeto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa parte do trabalho ocorrerá a exposição dos materiais que serão utilizados, bem como as características principais de cada um que serão impactantes para o estudo.

2.1 O MOTOR ELÉTRICO

O motor elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006). O motor mais comum de ser encontrado é o de indução trifásico, por ser mais barato, mais leve e com manutenção simplificada. O motor de indução possui rendimentos elevados e é modelado para operar em tensão e corrente alternada, com frequência de 60Hz, no caso do Brasil (WEG, 2016).

Os motores elétricos podem ser divididos em corrente alternada e corrente contínua:

(a) Motores elétricos de corrente contínua: Apresentam um custo mais elevado e necessitam de uma fonte de corrente contínua para alimentação. A vantagem de sua utilização é a variação de velocidade, mantendo-se um torque constante, com precisão para diversas aplicações (WEG, 2016);

(b) Motores elétricos de corrente alternada: Como a distribuição de energia é realizada em corrente alternada, a utilização desses tipos de motores é bem mais comum (WEG, 2016). Há ainda uma ramificação entre motores síncronos e assíncronos:

(b.1) Motores elétricos CA síncronos: A utilização se restringe a grandes potências. A velocidade de rotação não é influenciada pelo escorregamento, portanto, o motor gira com velocidade síncrona na frequência da rede. Não há variação de velocidade sem a utilização de um acionamento externo que viabilize tal prática, por exemplo, um inversor de frequência (WEG, 2016);

(b.2) Motores elétricos CA assíncronos: Também denominado motor de indução trifásico, sua rotação é influenciada pelo escorregamento, ou seja, sua

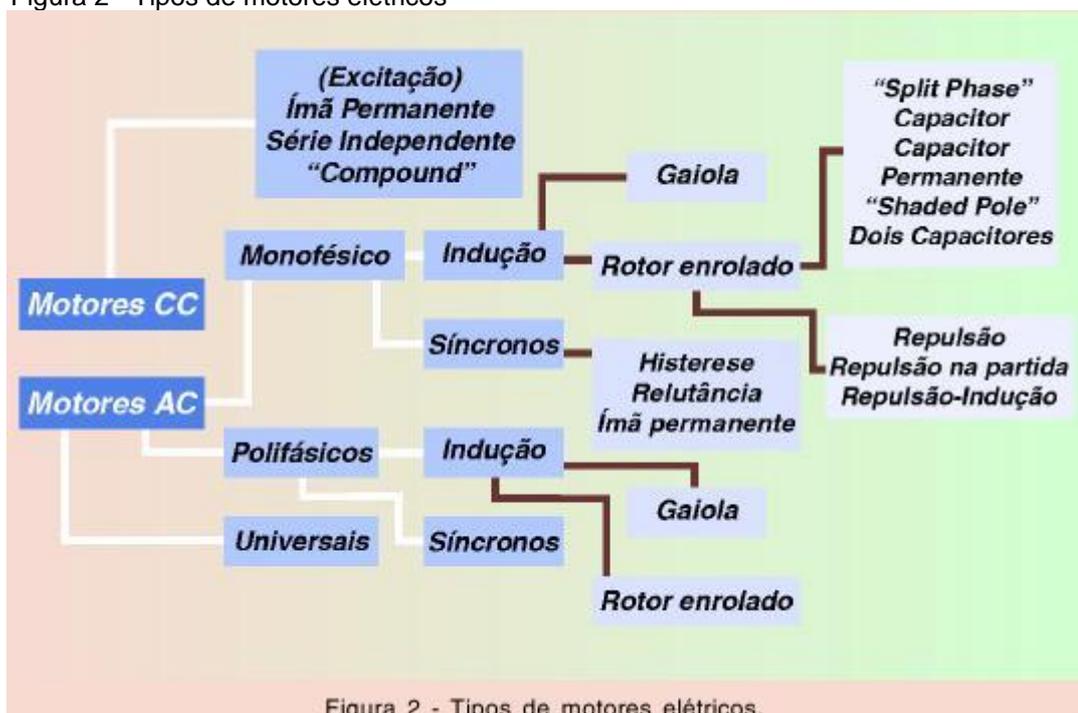
velocidade nominal não é igual a velocidade síncrona na frequência da rede. É o mais utilizado devido ao custo viável e sua velocidade pode ser controlada a partir de inversores de frequência (WEG, 2016).

(b.2.1) Motores de gaiola de esquilo: O enrolamento do rotor é curto-circuitado. A estrutura é formada por barras de cobre ou alumínio que se encaixam nas ranhuras e são conectadas a anéis coletores, cada um em uma extremidade do rotor (WEG, 2016).

(b.2.2) Motores de rotor bobinado: O enrolamento trifásico assemelha-se com o do estator, os terminais das bobinas conectam-se a anéis coletores no eixo. Fixadas aos anéis coletores, encontram-se as escovas de carvão que permitem o acesso ao rotor (WEG, 2016).

A divisão das famílias de motores elétricos e suas ramificações podem ser confirmadas na figura 2:

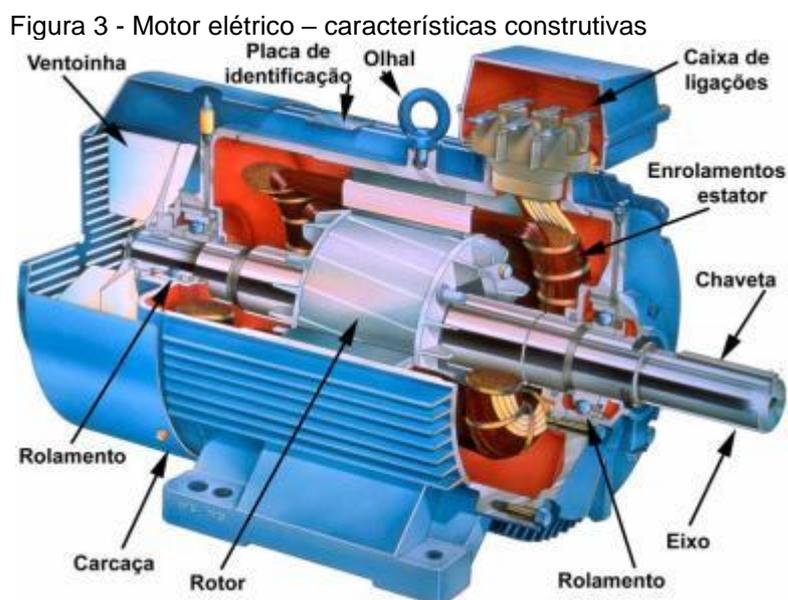
Figura 2 - Tipos de motores elétricos



Fonte: GOMES, S. R., 2015.

2.1.1 Características do Motor Elétrico

O motor de indução é o mais utilizado em processos industriais e sua forma construtiva está detalhada na figura 3:



Fonte: PORTAL DO ELETRICISTA, 2015.

O estator é composto pela carcaça, que é normalmente construída em ferro fundido e possui resistência contra corrosão. O enrolamento trifásico é composto por um conjunto de bobinas para cada fase e encaixa-se no núcleo de chapas de aço magnético (WEG, 2016).

O rotor é composto pelo eixo, o qual se encontra na extremidade de acoplamento e possui suporte para a chave. Possui um núcleo de chapas semelhante ao do estator, no qual fixam-se as barras de alumínio curto-circuitadas em suas extremidades nos anéis coletores (WEG, 2016).

A ventoinha, ou ventilador, tem como função auxiliar no resfriamento do motor elétrico e encontra-se enclausurada por uma tampa defletora na parte de trás da máquina. Os rolamentos devem ser lubrificados com graxa para facilitar a rotação do eixo e também necessitam de troca de graxa de tempos em tempos, conforme a placa de identificação determina. Os olhais estão disponíveis em motores com carcaça a partir do modelo 100L, devido ao fato de que são mais pesados e precisam de uma talha para locomoção. A caixa de ligação é o local que reserva os terminais de ligação do motor para ser alimentado na rede (WEG, 2016).

A placa de identificação traz todas as informações necessárias do motor, tal como na figura 4:

Figura 4 - Placa de identificação de um motor de 15 cv

WEG		W22 Premium		21SEP10 1000000000	
3 kW(HP-cv)	11 (15)	CAR. TENS.:	132M/L	MOTOR INDUÇÃO - CAIXA INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE	
V	220/380	A	37.6/21.8		
1760	Hz	60	1.25	8.3	0.83
92.4	AMB.	40°C	F	80 K	47/27.2 A
N	IP55	S1	Alt. 1000		
220 V Δ L1 L2 L3 W2 U2 V2 U1 V1 W1		380 V Y L1 L2 L3 W2 U2 V2 U1 V1 W1		79 Kg	
				-6308-ZZ	
				-6207-ZZ	
				MOBIL POLYREX EM	
CE		RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA APROXIMADOS PELO INMETRO INMETRO NBR - 17034-1:2008			

Fonte: WEG, 2012.

A partir da placa de identificação é possível ter conhecimento de qual tensão pode ser utilizada para alimentar o motor, bem como a corrente nominal em cada tensão específica. A placa também apresenta características importantes como a velocidade de rotação nominal, o rendimento, frequência, o conjugado e o fator de potência. Outros fatores também possuem devida importância, como a classe de isolamento, temperatura, altitude, esquema de ligação e grau de proteção. O modelo da carcaça do motor elétrico é definido segundo a distância entre o centro do eixo do rotor e o pé da máquina (WEG, 2012).

2.1.1.1 Velocidade do motor elétrico

Pode-se definir a velocidade síncrona da máquina como sendo a velocidade de rotatividade do campo girante (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006). Essa velocidade depende da frequência da rede e do número de polos do motor elétrico. O campo girante cursa por um par de polos (p) em cada volta (WEG, 2016).

A relação que define a velocidade síncrona é dada pela fórmula 1:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (\text{rpm}) \quad (1)$$

Onde:

n_s : Velocidade síncrona do motor (rpm);

f : Frequência da rede (Hz);

$2p$: Número de polos do motor;

Como já abordado anteriormente, os motores de indução são assíncronos, ou seja, sua velocidade nominal é diferente da velocidade síncrona e o responsável por essa diferença é o escorregamento (WEG, 2016). Na situação em que a máquina gira com uma velocidade menor que a síncrona, o enrolamento rotórico atravessa as linhas de força magnética, ocasionando, pelas leis eletromagnéticas, a circulação de correntes induzidas no enrolamento do rotor (WEG, 2016).

Quanto maior a carga, maior o torque do motor necessário para acioná-la (WEG, 2016). O conjugado será maior se as correntes induzidas forem maiores, então quanto maior a diferença de velocidade, maior o torque produzido. Portanto, pode-se concluir que conforme a rotação da máquina reduz, a carga e o torque aumentam (WEG, 2016). O escorregamento pode ser definido como na fórmula 2:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Onde:

s : Escorregamento do motor;

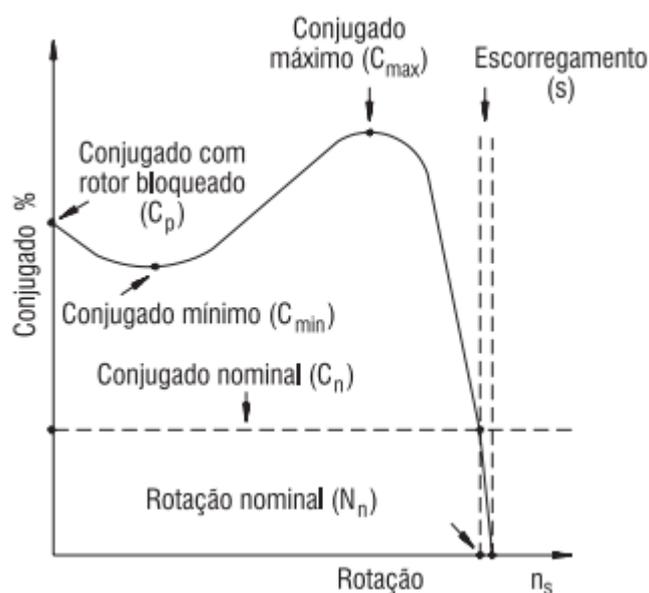
n : Velocidade nominal do motor (rpm);

n_s : Velocidade síncrona do motor (rpm);

2.1.1.2 Conjugado do motor elétrico

O conjugado do motor, ou torque, é definido como o esforço que o motor necessita para rotacionar o eixo (WEG, 2016). Na situação em que uma máquina aciona uma carga, conforme o aumento da mesma, a rotação do motor diminui até o torque atingir um valor máximo. Caso o torque de carga aumente ainda mais e o motor necessite realizar um torque maior que seu conjugado máximo, a rotação do motor decairá abruptamente, e há a possibilidade de travamento do rotor (WEG, 2016). O diagrama que relaciona a variação do conjugado com a velocidade, em um sistema de partida direta do motor, é representado no gráfico 3:

Gráfico 3 - Conjugado x velocidade



Fonte: WEG, 2016.

O conjugado do motor pode ser subdividido em grupos, tais como:

- (a) Conjugado básico: Definido por “C0” é calculado a partir da velocidade síncrona e da potência como mostrado na fórmula 3:

$$C_0 = \frac{7024 \cdot P}{n_s} \quad (\text{N.m}) \quad (3)$$

Onde:

C0: Conjugado básico do motor (N.m);

P: Potência mecânica do motor (cv);

ns: Velocidade síncrona do motor elétrico (rpm);

(b) Conjugado nominal: Torque realizado pelo motor sob condições de tensão, frequência e potência nominais (WEG, 2016).

(c) Conjugado de partida: Torque mínimo produzido com o motor bloqueado, em condições de frequência e tensão nominais. O conjugado de partida deve possuir o maior valor possível para conseguir sobrepor a inércia da carga e realizar uma aceleração mais intensa (WEG, 2016). É normalmente representado em porcentagem com relação ao conjugado nominal, de acordo com a fórmula 4:

$$Cp(\%) = \frac{Cp}{Cn} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

Cp: Conjugado de partida do motor (N.m);

Cn: Conjugado nominal do motor (N.m);

(d) Conjugado mínimo: É o menor valor de torque que o motor fornece desde a aceleração até atingir o valor de conjugado máximo. Para a partida do motor não demorar muito, o valor do torque mínimo não deve ser tão baixo, para não sobreaquecer o motor (WEG, 2016).

(e) Conjugado máximo: Como o próprio nome já diz, é o maior valor de torque produzido pelo motor, desde que esteja em condições nominais de tensão e frequência. É também o maior valor de conjugado sem que haja queda abrupta de rotação. Deve possuir o maior valor possível, devido ao fato de que a máquina necessita aguentar picos de carga e não deve perder a velocidade de rotação bruscamente (WEG, 2016).

2.1.1.3 Categorias do conjugado

Os motores elétricos são classificados em categorias quanto ao conjugado, cada uma delas depende do tipo de carga, velocidade e corrente de partida.

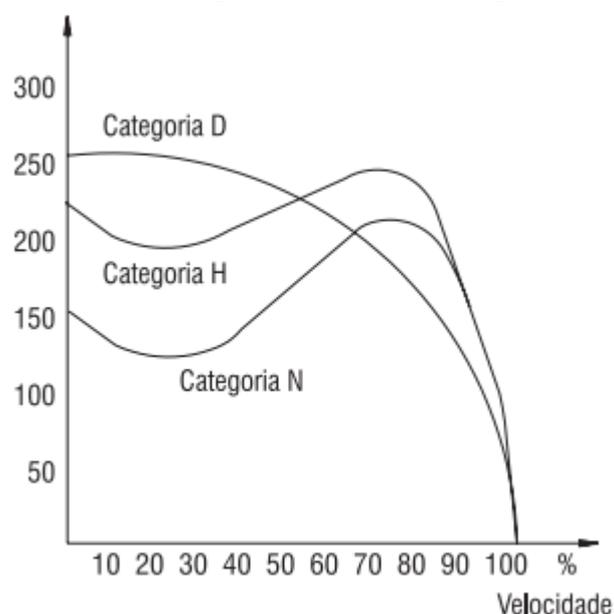
(a) Categoria N: É encontrada na maioria dos motores que circulam no mercado e são adequadas para acionamentos de ventiladores e bombas. O conjugado de partida é normal, assim como a corrente de partida. O escorregamento é baixo (WEG, 2016).

(b) Categoria H: Pode ser encontrada em acionamentos de cargas que necessitam de torque de partida elevado, como transportadores, britadores, peneiras e cargas com alta inércia em geral. O conjugado de partida nesse caso é elevado, enquanto a corrente de partida é normal e o escorregamento é baixo (WEG, 2016).

(c) Categoria D: Nesse caso, o conjugado de partida é alto, assim como o escorregamento. A corrente de partida é normal. É frequentemente utilizada em elevadores e acionamentos em que ocorrem picos de carga (WEG, 2016).

O gráfico que representa a relação do conjugado e a velocidade em todas as categorias é representado no gráfico 4:

Gráfico 4 - Conjugado x velocidade (categorias)



Fonte: WEG, 2016.

2.1.1.4 Conjugado da carga

Um motor elétrico é normalmente utilizado para o acionamento de uma carga. Por exemplo, uma bomba hidráulica, ou no caso desse trabalho, um ventilador. A carga possui uma velocidade nominal própria, bem como um conjugado nominal. De acordo com a potência da carga, pode-se definir o rendimento do acoplamento entre o motor e a mesma, de acordo com a fórmula 5:

$$\eta_{ac} = \frac{P_c}{P_n} \quad (5)$$

Onde:

η_{ac} : Rendimento do acoplamento entre motor e carga;

P_n : Potência nominal do motor elétrico (W);

P_c : Potência nominal da carga (W);

A potência nominal da carga é descrita conforme a fórmula 6:

$$P_c = 2 \cdot \pi \cdot n_c \cdot C_{cn} \cdot 10^{-3} \quad (W) \quad (6)$$

Onde:

P_c : Potência nominal da carga (W)

n_c : Velocidade nominal da carga (rpm);

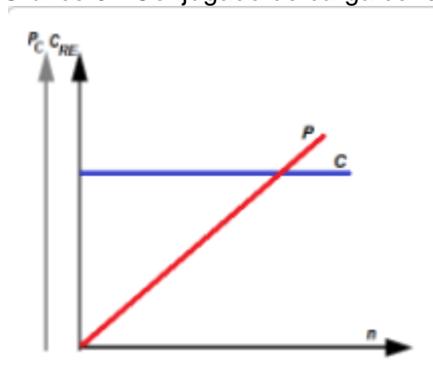
C_{cn} : Conjugado nominal da carga (N.m);

O conjugado resistente da carga pode ser dividido em quatro modalidades diferentes:

- (a) Conjugado constante: Nesse caso o conjugado resistente da carga mantém-se constante ao longo da variação de velocidade e a potência que está sendo consumida pela carga aumenta de forma proporcional em relação a

velocidade. É aplicável em guindastes, pontes rolantes, britadores (LENZ, A. L., 2014). A curva característica é representada pelo gráfico 5:

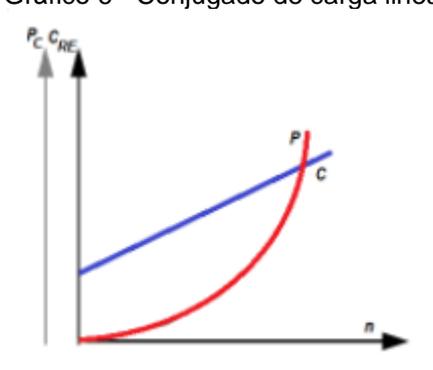
Gráfico 5 - Conjugado de carga constante



Fonte: LENZ, A. L., 2014.

- (b) Conjugado linear: O conjugado resistente da carga varia de forma linear em relação a velocidade e a potência que é consumida pela carga altera-se conforme o quadrado da velocidade. Aplicável em bombas centrífugas e bombas a vácuo (LENZ, A. L., 2014). A curva é representada pelo gráfico 6:

Gráfico 6 - Conjugado de carga linear

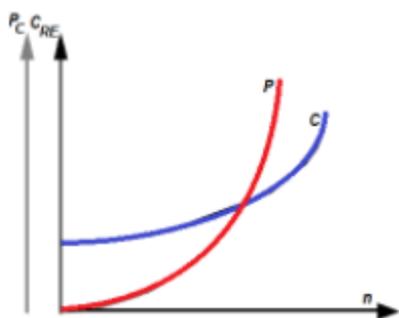


Fonte: LENZ, A. L., 2014.

- (c) Conjugado quadrático: O conjugado resistente de carga altera-se com relação ao quadrado da velocidade e a potência que a carga consome modifica-se de acordo com o cubo da velocidade (LENZ, A. L., 2014). Aplicação utilizada em ventiladores.

A curva é representada no gráfico 7:

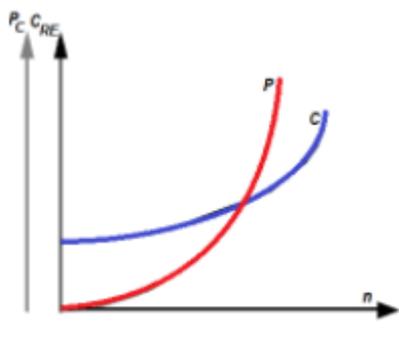
Gráfico 7 - Conjugado de carga quadrático



Fonte: LENZ, A. L., 2014.

- (d) Conjugado hiperbólico: O conjugado de partida deverá ser alto para vencer o conjugado resistente de carga. Depois da partida, o conjugado começa a diminuir e a velocidade de rotação aumenta, mantendo a potência constante (LENZ, A. L., 2014). Aplicável em bobinadeiras e desbobinadeiras de papel. A curva é representada no gráfico 8:

Gráfico 8 - Conjugado de carga hiperbólico



Fonte: LENZ, A. L., 2014.

2.1.1.5 Rendimento do motor elétrico

O rendimento é a eficácia na qual é realizada a transformação da energia elétrica absorvida, desde a rede, em energia mecânica no eixo do motor (WEG, 2016). A potência fornecida pela rede não é totalmente convertida em potência mecânica, sendo assim, não existe motor elétrico com 100% de rendimento (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006). As perdas no enrolamento, no ferro e por

ventilação são as principais responsáveis pela não conversão completa de potência elétrica em potência mecânica (WEG, 2016).

O rendimento é representado na fórmula 7:

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{P_e} \quad (7)$$

Onde:

η : Rendimento do motor elétrico;

P_m : Potência disponível no eixo do motor (kW);

P_e : Potência elétrica absorvida da rede pelo motor (kW);

A potência elétrica absorvida pela rede é dada pela equação 8:

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \quad (W) \quad (8)$$

Onde:

P_e : Potência elétrica consumida pelo motor elétrico (W);

U : Tensão de alimentação do motor elétrico (V);

I : Corrente elétrica medida no motor elétrico (A);

$\cos\phi$: Fator de potência do motor elétrico;

A potência disponível no eixo do motor elétrico é normalmente expressa em cavalo-vapor (cv), para converter esse valor em watts (W), é necessário utilizar a fórmula 9:

$$P_m = 736 \cdot P \quad (W) \quad (9)$$

Onde:

P_m : Potência nominal do motor elétrico (W);

P: Potência nominal do motor elétrico (cv);

O rendimento pode ser representado como na fórmula 10:

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi} \cdot 100 \quad (10)$$

Onde:

η : Rendimento do motor elétrico;

P_m : Potência disponível no eixo do motor elétrico (W);

U: Tensão de alimentação do motor elétrico (V);

I: Corrente elétrica medida no motor elétrico (A);

$\cos\phi$: Fator de potência do motor elétrico;

Quanto maior o rendimento do motor elétrico, mais potência o mesmo consegue converter no eixo. E quanto menor o rendimento, maiores são as perdas e conseqüentemente, se há potência desperdiçada, o mesmo acontece com a energia (WEG, 2016). A relação entre as grandezas se dá pela fórmula 11:

$$E = P_e \cdot t \quad (\text{kWh}) \quad (11)$$

Onde:

E: Energia elétrica consumida (kWh);

P_e : potência elétrica absorvida da rede pelo motor elétrico (kW);

t: Tempo de consumo de energia (h);

A energia é medida no S.I em Joules, mas no caso da energia elétrica, a medição é feita sempre em kWh (WEG, 2016).

O motor com maior rendimento é o Wmagnet, com eficiência estimada em 96,7%. É uma máquina síncrona, com ímãs permanentes no rotor e só pode ser acionada com um inversor de frequência (WEG, 2016). Esse motor atende os dois últimos níveis de rendimento, IR4 e IR5, que são o super Premium e ultra Premium,

excedendo em 1 e 2 níveis o índice de rendimento mínimo (IR3) delimitado pela Portaria Interministerial nº1 de junho de 2017 (MME, 2017).

2.1.1.6 Perdas no motor elétrico

A potência absorvida na rede pelo motor elétrico não é completamente convertida em potência disponível no eixo. Nesse ínterim, há perdas de várias características, por isso o rendimento nunca é de 100% (WEG, 2016). As perdas podem ser classificadas em:

- (a) Perdas por efeito Joule: Perdas por aquecimento que ocorrem nos enrolamentos do rotor e do estator, dependem da resistência do cobre (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006).
- (b) Perdas mecânicas: Perdas por atrito nos mancais e perdas em consequência da potência exigida para circulação de ar na máquina por meio do ventilador (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006).
- (c) Perdas no ferro: Perdas por histerese e por correntes parasitas, também chamadas de correntes de Foucault. Essas dependem do quadrado da densidade de fluxo, da frequência e da espessura das chapas do motor. Para reduzir as perdas, é necessário reduzir a área das chapas por onde a corrente irá circular, quanto maior a área, maior a resistência, portanto, menor a corrente (FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D, 2006). De acordo com a fórmula 12:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (\Omega) \quad (12)$$

Onde:

R: Resistência do condutor (Ω);

L: Comprimento do condutor (m);

ρ : Resistividade do condutor ($\Omega.m$);

A: Área da seção transversal do condutor (m^2);

2.1.1.7 Fator de potência

O fator de potência é definido como $\cos\phi$ e o ângulo " ϕ " é a defasagem entre a tensão e a corrente. Sendo potência ativa P_e e potência reativa definida como na fórmula 13:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (\text{VA}) \quad (13)$$

Onde:

S: Potência elétrica aparente (VA);

U: Tensão de alimentação (V);

I: Corrente elétrica (A);

O fator de potência pode ser definido como na fórmula 14:

$$\cos\phi = \frac{P_e}{S} \quad (14)$$

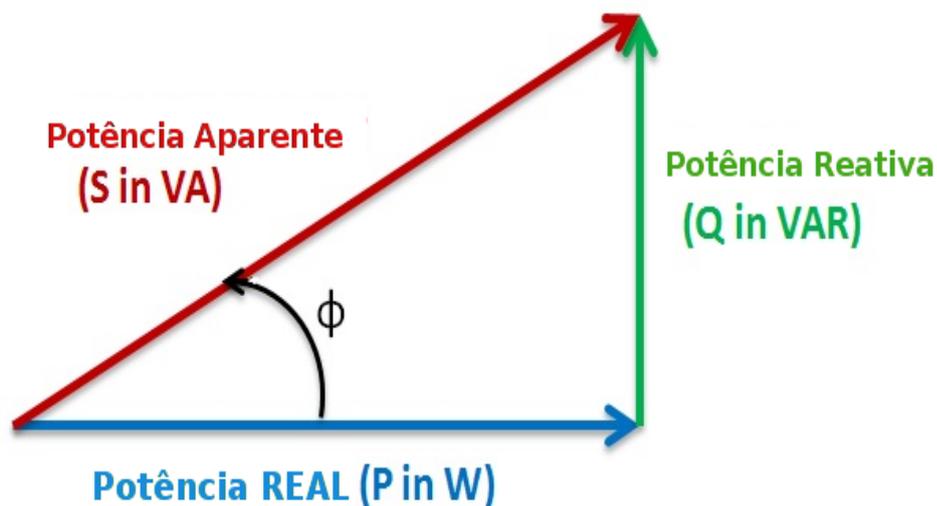
Onde:

P_e : Potência elétrica ativa (W);

S: Potência elétrica aparente (VA);

O triângulo de potências está representado na figura 5:

Figura 5 - Triângulo de potências



Fonte: PORTAL DA ELETRICIDADE, 2017.

O tipo de carga é caracterizado conforme a tabela 3:

Tabela 3 – Tipos de cargas em relação ao fator de potência

$\cos\phi$	Carga
1	Resistiva
Atrasado	Indutiva
Adiantado	Capacitiva

Fonte: WEG, 2016.

O motor elétrico consome potência ativa, que posteriormente é convertida em trabalho e perdas por aquecimento e também potência reativa, a qual não é transformada em trabalho, mas auxilia na magnetização (WEG, 2016). O fator de potência mínimo para as cargas é de 0,92, para que haja maior índice de potência ativa disponível na rede, devido ao fato de que a potência reativa reduz a eficácia de transporte de potência útil (ANEEL, 2013).

2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência possibilita a variação de velocidade de rotação de um motor de indução trifásico. Esse drive realiza conversão CA/CA, procedimento no qual a rede fornece tensão com frequência e amplitude constantes e é realizada a transformação em tensão com amplitude e frequência variáveis (WEG, 2016). O inversor possui a capacidade de variar a frequência fornecida pela rede e com isso há um controle da potência que a carga consome. A partir do momento em que se varia a frequência, a velocidade de rotação do campo girante também varia, ou seja, a velocidade síncrona modifica-se, conseqüentemente variando a velocidade de rotação do motor (WEG, 2016).

Há diferentes modelos de inversores, cada um destinado a um tipo de carga específico. De acordo com a aplicação da carga, da potência, tensão e corrente, é possível determinar qual drive é o ideal para utilização.

O modelo do drive CFW300 da WEG é mostrado na figura 6:

Figura 6 - Inversor de frequência CFW300



Fonte: WEG, 2018.

De acordo com a figura 6, pode-se notar que esse modelo de inversor possui uma “IHM”, por onde pode ser feita a parametrização do drive de acordo com a aplicação final.

Os parâmetros disponíveis são:

- (a) Parâmetros de leitura;
- (b) Parâmetros de regulação;
- (c) Parâmetros de configuração;
- (d) Parâmetros do motor;

O inversor de frequência PWM é o mais utilizado hoje em dia (WEG, 2016). O drive é composto por três estágios importantes que possibilitam a variação e o controle de velocidade do motor elétrico, são esses:

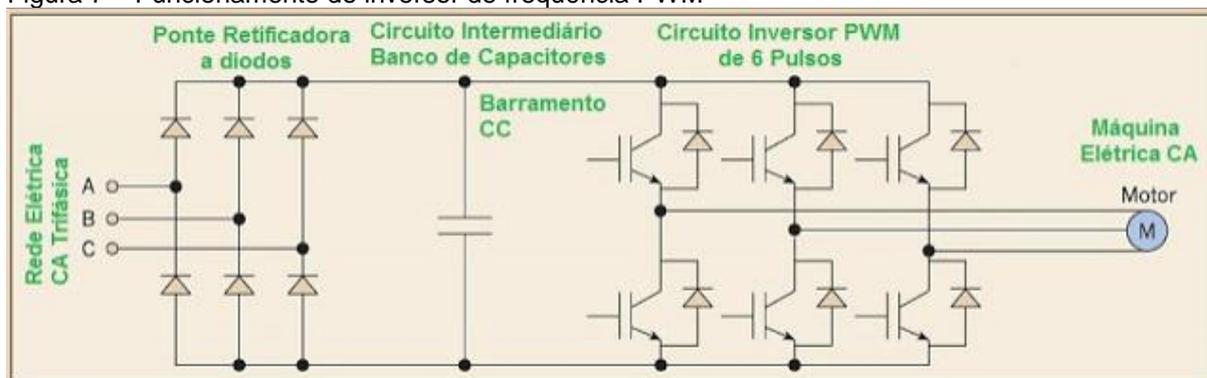
(a) Ponte retificadora: Uma ponte de diodos que tem como função converter a tensão alternada recebida da rede em tensão contínua (LENZ, A. L., 2013).

(b) Link DC: Filtro de capacitores para armazenamento de energia e regulação da tensão contínua recebido da ponte retificadora (LENZ, A. L., 2013).

(c) Módulo IGBT: Os transistores IGBT têm como função converter o sinal de tensão contínua recebido pelo link DC em tensão alternada, com frequência e amplitude variáveis (LENZ, A. L., 2013).

O esquema de funcionamento pode ser melhor representado na figura 7:

Figura 7 – Funcionamento do inversor de frequência PWM



Fonte: LENZ, A. L., 2013.

2.2.1 Variação da Velocidade

A amplitude da tensão deve variar proporcionalmente à variação da frequência para que o motor elétrico possa trabalhar em uma faixa de velocidades (WEG, 2016). O torque magnético do motor pode ser representado pela fórmula 15:

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_2 \quad (\text{N.m}) \quad (15)$$

Onde:

T: Conjugado do motor (N.m);

K: Constante que depende do material;

Φ : Fluxo magnético (Wb);

I_2 : Corrente no rotor (A);

O fluxo magnético é dado pela fórmula 16:

$$\Phi = K \cdot \frac{V}{f} \quad (\text{Wb}) \quad (16)$$

Onde:

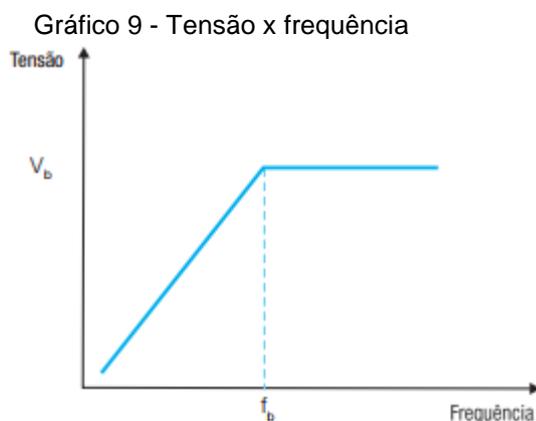
Φ : Fluxo magnético (Wb);

K: Constante que depende do material;

V: Tensão no estator (V);

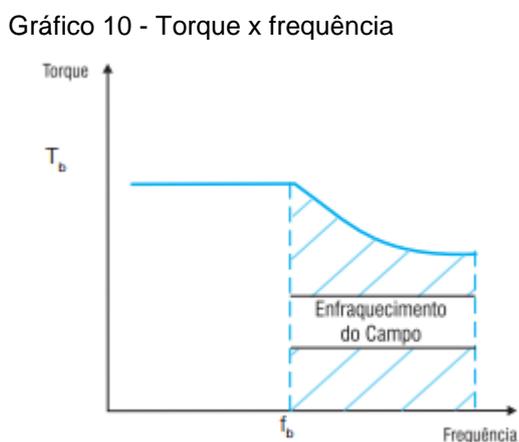
f: Frequência de alimentação da rede (Hz);

A relação V/f varia linearmente até o ponto de frequência nominal do motor, conforme o gráfico 9:



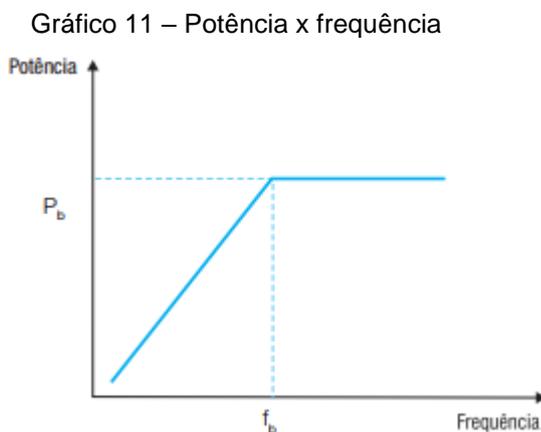
Fonte: WEG, 2016

Para valores de frequência acima da frequência de operação, que normalmente é 60 Hz, o fluxo magnético diminui e o torque do motor reduz, na região conhecida como “enfraquecimento de campo” (WEG, 2016). A região é representada no gráfico 10:



Fonte: WEG, 2016.

Conseqüentemente, a potência mecânica do motor varia linearmente até a frequência de operação. Para valores maiores de frequência, a potência permanece constante, de acordo com o gráfico 11:



Fonte: WEG, 2016.

O controle dos inversores pode ser dividido em escalar e vetorial, sendo que:

- (a) Controle escalar: Parte do princípio V/f constante, em que ocorre a variação da amplitude da tensão proporcionalmente à frequência, mantendo a relação citada anteriormente, constante. O fluxo magnético permanece praticamente constante, assim como o torque. Esse tipo de aplicação é comum em situações em que há vários motores conectados a um único inversor de frequência (WEG, 2016).
- (b) Controle vetorial: Este tipo de controle permite um maior grau de precisão no domínio da velocidade e do torque do motor elétrico. Basicamente, o mecanismo divide a corrente da máquina em dois vetores, um deles irá originar o fluxo magnético e o outro, o torque. Nesse caso, o torque e o fluxo serão regulados separadamente (WEG, 2016). O controle vetorial pode ser dividido em:

(b.1) Com sensor de velocidade: Controle em malha aberta. Um sensor de velocidade deve ser instalado no motor, como um encoder, por exemplo. Esse

controle em específico possibilita a maior precisão de controle de velocidade e de torque (WEG, 2016).

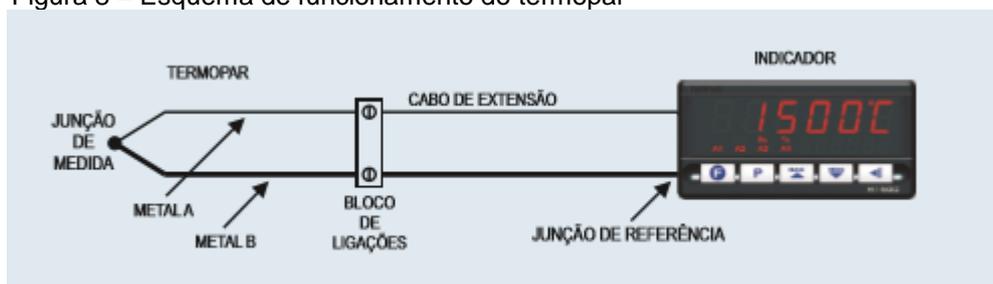
(b.2) Sensorless: Sem sensor de velocidade, por isso seu processo é mais simplificado. A desvantagem é a limitação do torque em rotações baixas, porém, acaba sendo satisfatória a utilização em velocidades mais altas, assim como o controle com sensor de velocidade (WEG, 2016).

2.3 TRANSDUTOR DE TEMPERATURA

O termopar é basicamente um sensor de temperatura composto por uma dupla de fios metálicos, os quais são fabricados de materiais diferentes e têm suas pontas conectadas (NOVUS, 2018). Existem duas junções, cada uma delas é exposta a temperaturas diferentes, gerando uma força eletromotriz. A junção de medida se situará na água nesse caso, e a junção de referência ficará em contato com o ar (NOVUS, 2018).

A representação do esquema está na figura 8:

Figura 8 – Esquema de funcionamento do termopar



Fonte: NOVUS, 2018.

A ligação na entrada do transdutor se dará de acordo com a figura 9:

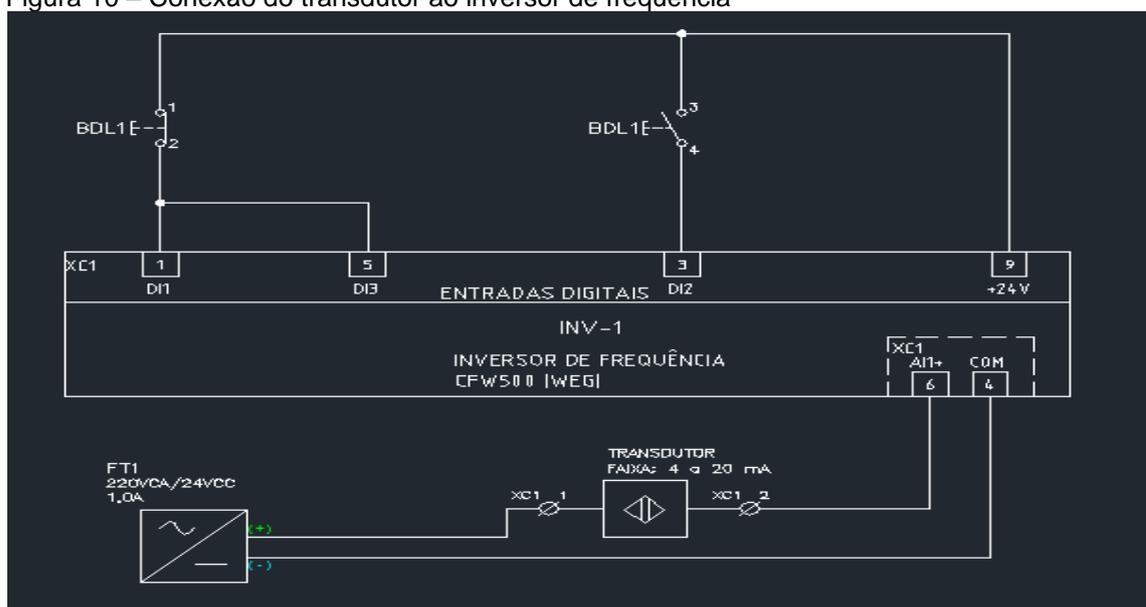
Figura 9 - Alimentação do transdutor



Fonte: NOVUS, 2018.

O termopar é conectado nos terminais 3 a 6 do sensor de temperatura e tem como função medir o sinal em grandeza de resistência elétrica, em ohms. Então, esse sinal é enviado para o sensor de temperatura que fará uma comparação da resistência com a corrente, ou seja, a proporcionalidade de 4 a 20 mA, comparando também com a proporção de temperatura de fábrica do transdutor, de 0 a 50 °C (NOVUS, 2018). A conexão do transdutor ao inversor se dá conforme a figura 10:

Figura 10 – Conexão do transdutor ao inversor de frequência



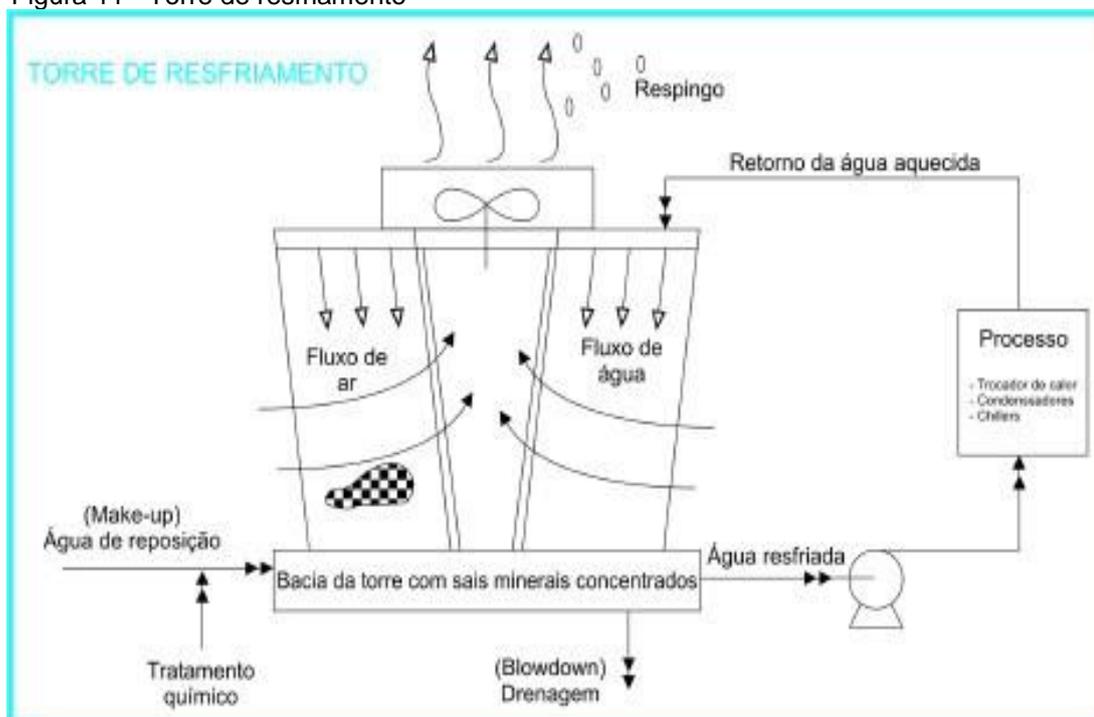
Fonte: O AUTOR, 2018.

A entrada -1 do sensor será conectada na entrada positiva da fonte de tensão e a entrada +2 do sensor será ligada na entrada analógica AI1 do inversor de frequência. O sinal analógico de 4 a 20 mA é proporcional a faixa de temperatura de 0 a 50 °C. O próximo passo é parametrizar o inversor para que o mesmo possa ler corretamente a temperatura.

2.4 TORRE DE RESFRIAMENTO

A torre de resfriamento é utilizada para refrigeração das máquinas na indústria. É necessária a utilização de um ou mais ventiladores para refrigeração da água quente que chega na torre. Após sair da torre, a água realiza troca de calor enquanto realiza seu trajeto e resfria as máquinas. Pode-se observar um fluxograma da torre na figura 11:

Figura 11 - Torre de resfriamento



Fonte: REVISTA TAE, 2010.

A água canalizada é transportada através das máquinas para o resfriamento das mesmas. Ao longo do percurso, a água realiza trocas de calor com as máquinas e também há o aumento de temperatura devido ao seu movimento. Quando a água

chega na torre, é necessário resfriá-la novamente, e os ventiladores exercem essa função (REVISTA TAE, 2010). O termopar fica em contato com a água, e deve informar ao inversor a temperatura da água para que o drive controle a velocidade do ventilador para a temperatura de 25°C.

2.5 METODOLOGIA

O procedimento para o estudo de eficiência energética consiste primeiramente na obtenção dos dados do motor a ser estudado. Tanto para fins de cálculo, quanto para a simulação no software CEE, o qual será utilizado e apresentado na Análise dos Resultados, é estritamente necessário ter conhecimento de parâmetros importantes, tais como tensão de operação, corrente nominal do motor, fator de potência, rendimento, tarifa de energia elétrica.

A partir dos dados de placa do motor elétrico W22 Plus IR2 de 7,5 cv e também de informações de quantas horas por dia e quantos dias por ano o motor opera, pode-se calcular a demanda da máquina elétrica e o consumo de energia anual. O cálculo da demanda, do consumo anual e do custo total será descrito e também simulado.

O segundo passo é coletar as informações do motor W22 IR3 Premium de 7,5 cv, que se encontram disponíveis no site da WEG. Calcula-se novamente a demanda, consumo anual e custo total de operação, mas desta vez levando-se em consideração o motor IR3 Premium.

O terceiro passo é avaliar a utilização do inversor de frequência para variar a velocidade de rotação do motor Premium. A partir dos dados da torre de resfriamento, pode-se calcular a velocidade média em que a máquina irá operar e a porcentagem de carga média que será acionada. Novamente é realizado o cálculo de demanda, consumo anual e custo total do sistema com inversor de frequência.

Por fim, é realizado o cálculo do payback comparando-se o custo total do sistema atual com o sistema proposto com inversor de frequência, assim como a comparação de demanda requerida pelo sistema nos 3 casos. A parametrização do inversor deve ser realizada corretamente para que o sistema funcione.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta parte do trabalho, será feita a análise do desempenho, consumo e custo do motor W22 IR2 Plus com potência de 7,5 cv em uso na indústria. Em seguida, será realizada uma análise de operação com um motor de rendimento superior, o W22 IR3 Premium com a mesma potência, acionado por um inversor de frequência.

3.1 SOFTWARE CEE

O software CEE é exclusivo da WEG e não é aberto ao público. Somente parceiros são autorizados a utilizar o software. De uma maneira detalhada e a partir de um banco de dados interno, o software realiza o estudo de eficiência energética. É necessário fornecer dados de operação do motor elétrico, e a partir disso o software realiza o cálculo de demanda, consumo anual, custo total e payback.

3.1.1 Dados da planta industrial

O primeiro passo para a análise de eficiência energética dos motores é informar os dados da fatura e a tarifa de energia elétrica para o software, de acordo com a figura 12:

Figura 12 - Dados da tarifa de energia

A imagem mostra a interface do software CEE da WEG, especificamente a aba "Dados da Fatura". O formulário está dividido em três seções principais:

- Dados da Fatura de Energia Elétrica:** Contém campos para "Tensão da planta (v)" com o valor 380.0, "Frequencia da rede (hz)" com o valor 60.0 (selecionado em um menu suspenso), "Fator de carga da instalação (%)" com o valor 100.0 e "Fator de coincidência ponta (%)" com o valor 100.0.
- Tarifas de Energia:** Possui campos para "\$/kwh ponta" com o valor 0,44, "\$/kw ponta" (campo vazio), "\$/kwh fora ponta" com o valor 0,44 e "\$/kw fora ponta" (campo vazio).
- Venda de Energia:** Possui campos para "% do excedente vendido:" (campo vazio) e "\$ kwh vendido:" (campo vazio).

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

É de extrema importância o conhecimento da tensão da planta, além do fator de carga da instalação. A frequência utilizada no Brasil é de 60 Hz (WEG, 2016). A

demanda da indústria em questão é contratada, e o valor da tarifa na ponta e fora da ponta é o mesmo nesse caso, R\$ 0,44/kWh tanto no horário de ponta, quanto no horário fora da ponta. O horário de ponta é o período de três horas em sequência em que o consumo de energia é mais alto durante o dia, nesse caso das 18h às 21h. (COPEL, 2017). O horário fora da ponta é o restante das horas do dia que não façam parte do horário de ponta, nesse caso das 21h às 18h. (COPEL, 2017).

A segunda aba, denominada “condições comerciais”, é onde os valores de ICMS e TMA devem ser fornecidos. Nesse caso, para o estado do Paraná o ICMS é de 18% e o TMA 12% (SAGE, 2017).

3.1.2 Motor Elétrico W22 IR2 Plus

Tendo em mãos todos os dados de placa do motor elétrico, o próximo passo é utilizar o software CEE da WEG para analisar o sistema com o motor W22 IR2 Plus e propor uma solução com motor IR3 Premium. O motor a ser analisado tem as características de acordo com a figura 13:

Figura 13 – Fotografia da placa do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv



Fonte: O AUTOR, 2018. Créditos da imagem: HUHTAMAKI DO BRASIL LTDA.

A placa apresenta dificuldades para uma fácil leitura dos dados de placa, porém, os dados são apresentados na figura 14:

Figura 14 - Dados de placa do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv

Características
• Carcaça: 160M
• Potência: 7,5 HP
• Frequência: 60 Hz
• Polos: 8
• Rotação nominal: 880
• Escorregamento: 2,22 %
• Tensão nominal: 220/380/440 V
• Corrente nominal: 23,2/13,4/11,6 A
• Corrente de partida: 116/67,2/58,0 A
• I_p / I_n : 5,0
• Corrente a vazio: 13,0/7,53/6,50 A
• Conjugado nominal: 59,7 Nm
• Conjugado de partida: 180 %
• Conjugado máximo: 230 %
• Categoria: ---
• Classe de isolamento: F
• Elevação de Temperatura: 80 K
• Tempo de Rotor Bloqueado: 25 s (quente)
• Fator de serviço: 1,15
• Regime de serviço: S1
• Temperatura Ambiente: -20°C – +40°C
• Altitude: 1000 m
• Proteção: IP55
• Massa aproximada: 113 kg
• Momento de inércia: 0,13166 kgm ²
• Nível de ruído: 54 dB(A)

Fonte: WEG, 2018.

Os modelos do motor W22 IR2 Plus são pintados na cor azul, e o modelo de 7,5 cv de potência encontra-se representados na figura 15:

Figura 15 - Motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv



Fonte: WEG, 2018.

A partir dos dados do motor W22 IR2 Plus, o próximo passo é preencher os campos relevantes para que o software possa reconhecer o motor em questão no seu banco de dados interno. O procedimento se dá como na figura 16:

Figura 16 - Dados do motor IR2 Plus de 7,5 cv

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Informações do Motor							
Quantidade:	1.0	Idade:	7.0	Potência (cv):	7.5	Potência (kw):	5.5
Pólos:	08	Rotação (rpm):	875.0	Nível de rendimento:	W22 Plus	Corrente nominal (a):	13.4
Frequência:	60Hz	Nº de rebobinagens:					
Tensão (v):	380.0						
Cargaça:	160M						
Dados da Aplicação							
Área:	João	Tag:	Vent. Leos	Hop/dia fora ponta:	21.0	Hop/dia ponta:	3.0
Dias de op./ano:	365.0	Curva de conjugado da carga:	Parabólico	Temperatura ambiente (°C):	40.0	Altitude (m):	1000.0
Carga acionada:	Ventilador						
Medições							
Fases rs:	380.0	Fases r:	13.4				
St:	380.0	S:	13.4				
Tr:	380.0	T:	13.4				
Potência absorvida:		Fator de potencia:					
Otimizar Cálculo:	<input type="checkbox"/>						

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

Como colocado na figura 16, primeiramente é necessário informar a quantidade de motores em análise, bem como a potência, tensão de operação, idade média dos motores, modelo e corrente nominal. O conjugado de carga deve ser informado, no caso da torre, o torque do ventilador é, por definição, do tipo parabólico. A altitude e temperatura nesse caso são valores em condições normais de operação, 1000 metros e 40°C, respectivamente (WEG, 2016). Por fim, é necessário informar as tensões entre as fases (tensão de linha) e a corrente em cada fase. No caso, os valores são a tensão de operação e a corrente nominal, respectivamente.

O motor W22 IR2 Plus que opera atualmente possui os detalhes técnicos conforme a figura 17:

Figura 17 - Detalhes Técnicos do motor atual

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Características Técnicas							
Linha elétrica atual:	W22						
Data de fabricação:	01/01/2011	Entidade norma:	IEC				
Involucro:	FECHADO	Material involucro:	FERRO				
Tipo polaridade:	UNICA	Aplicação do motor:	Geral				
Fabricante:		Nº de série:					
Classe de isolamento:	F (DT=105K)	Fator de serviço:	1.00				
Grau de proteção:	IP55	Ventilação forçada:	Não				
Tipo e tamanho flange:		Forma construtiva mercado:					
Observação:							

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

Esses são os dados técnicos que devem ser preenchidos na aba “Detalhes Técnicos” para que o banco de dados do software possa identificar o motor correto que está em uso. É importante ressaltar que tanto a aba “dados do motor”, quanto a aba “Detalhes Técnicos” são importantes para o reconhecimento do motor correto. No caso do motor em estudo, a idade média é de 7 anos.

3.1.3 Cálculo da Frequência Média de Operação

Na aba “Método de partida” é preciso preencher o método de partida atual do motor e o método de partida proposto. No caso, o atual é uma partida direta e o proposto será com inversor de frequência. A operação com o drive CFW500 se dará com uma certa velocidade a cada instante, sendo assim não é possível saber exatamente quanto o motor consumirá. A WEG realiza um estudo específico para cada cidade, analisando os dados da torre de resfriamento em estudo e também a cidade em que a torre se encontra.

Para essa análise é necessário informar os dados da torre de resfriamento, tal como na figura 18:

Figura 18 - Dados da torre de resfriamento

A placa de identificação da torre de resfriamento de água da Alpina Equipamentos contém as seguintes informações:

ALPINA EQUIPAMENTOS					
TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA					
Taq:	52,0	°C	VAZÃO:	55,2	m³/h
Taf:	30,0	°C	PRESSÃO:	4,9	mCA
Tbu:	24,0	°C			

CLIENTE: HUHTAMAKI DO BRASIL LTDA

MODELO	ORDEM DE FABRICAÇÃO	DATA
80/18-RT-I-E	E/31.190	23/10/15

ALPINA EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA
ESTRADA MARCO POLO 940 PABX (0_11) 4397-9133
SÃO BERNARDO DO CAMPO, SP FAX (0_11) 4397-9104
CEP 09844-150 E-MAIL torres@alpina.com.br
IND. BRASILEIRA

Fonte: O AUTOR. Créditos da imagem: HUHTAMAKI DO BRASIL LTDA.

A partir dos dados da torre é possível realizar uma simulação feita pela própria WEG para fornecer um valor médio de frequência para que o inversor opere. De acordo com a figura 18, “Taq” é definida como a temperatura de entrada da água na torre e “Taf” é a temperatura de saída da água da torre. A temperatura de bulbo úmido é definida como “Tbu”. Todas as três variáveis citadas devem ser informadas para a correta simulação. As demais variáveis necessárias são características da cidade em estudo, no caso Palmeira, situada no estado do Paraná.

A simulação é mostrada na figura 19:

Figura 19 - Cálculo de frequência média

RELATÓRIO EXECUTIVO			
ESTADO:	PR	MUNICÍPIO:	PALMEIRA
DADOS DO MUNICÍPIO		TORRE	
ALTITUDE:	865,0 m	VAZÃO DE AR:	Estimada m ³ /h
TEMP. DE BULBO ÚMIDO:	24,0 °C	VAZÃO DE ÁGUA:	Estimada m ³ /h
TEMP. DE BULBO SECO:	35,2 °C		
TEMP. MÉDIA AMBIENTE:	15,2 °C	TEMP. ENTRADA DE ÁGUA:	52,0 °C
UMIDADE MÉDIA RELATIVA:	78,8 %	TEMP. SAÍDA DE ÁGUA:	30,0 °C
FREQUÊNCIA MÉDIA CALCULADA:		53,9 Hz	ECONOMIA DE ÁGUA:
			1,9 %

Fonte: Imagem da tela do software de cálculo de frequência média da WEG.

Sendo assim, há um valor médio da velocidade de rotação que o inversor proporcionará ao motor elétrico, esse valor é de 53,9 Hz, de acordo com a figura 19. A ideia da simulação é mostrar que, mesmo com uma média de velocidade de rotação diária pouco menor que o valor na frequência nominal, a economia de energia utilizando o inversor é grande. A aba método de partida deve ser preenchida como na figura 20:

Figura 20 - Método de partida

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Sistemas de Bombeamento e Ventilação							
Controle de fluxo: Nenhum		Pressão:		Vazão:			
Pressão requerida:				Vazão de operação:			
Método de Partida Atual				Método de Partida Proposto			
Metodo de partida: DIRETO				Metodo de partida: INVERSOR DE FREQUÊNCIA			
Tap (%):		Rotação:		Tap(%):		Rotação: Hz	
Tempo:				Tempo: %		Cálculo:	
1:		1:		1:	100.0	1:	53.9
2:		2:		2:		2:	
3:		3:		3:		3:	
4:		4:		4:		4:	
5:		5:		5:		5:	
6:		6:		6:		6:	
Total:		Total:		Total:		Total:	

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

3.1.4 Detalhes de Regime do Motor Elétrico

O tipo de acoplamento entre ventilador e motor é do tipo direto e permanecerá assim, com rendimento de 100%, e deve ser informado na aba “Acoplamento” de acordo com a figura 21:

Figura 21 - Acoplamento entre motor e ventilador

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Acoplamento Atual Acoplamento: DIRETO Redução: 1.0 Diâmetro da polia movida (mm): Diâmetro da polia motora (mm): Distância entre centros (mm): Largura da polia motora (mm): Rendimento atual: 100.0				Acoplamento Proposto Acoplamento: DIRETO Redução: 1.0 Diâmetro da polia movida (mm): Diâmetro da polia motora (mm): Distância entre centros (mm): Largura da polia motora (mm): Rendimento proposto: 100.0			

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

O regime de serviço utilizado pelo motor é o S1, no qual o motor permanece funcionando continuamente após seu acionamento (WEG, 2016). Sendo assim, não ocorrem desligamentos e religamentos periódicos. O funcionamento do motor é contínuo. Esse fator deve ser informado na aba “Detalhes do Regime” do software CEE, tal como na figura 22:

Figura 22 - Detalhes do Regime de serviço do motor

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Detalhes do Regime Regime de serviço: S1 Regime de operação: Contínuo							

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

O próximo passo é informar as características específicas de conjugado, corrente e momento de inércia do motor elétrico W22 IR2 Plus. Tais dados encontram-se na figura 14:

- $C_p/C_n = 1,8$;
- $I_p/I_n = 5$;
- $C_{m\max}/C_n = 2,3$;
- $J = 0,13166 \text{ kg.m}^2$;

Após a coleta dos dados citados anteriormente, é necessário preencher os campos de cada um deles na aba “Redimensionamento”, como na figura 23:

Figura 23 - Redimensionamento do motor elétrico

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Dados do Motor							
Tempo de partida (s):	<input type="text"/>	Potência absorvida (kw):	<input type="text"/>				
Ip/in:	<input type="text" value="5.0"/>	Cmax/cn:	<input type="text" value="2.3"/>				
Cp/cn:	<input type="text" value="1.8"/>	J (kgm2):	<input type="text" value="0.13166"/>				
Pedestal de tensão (%):	<input type="text"/>	Tempo de rampa (segundos):	<input type="text"/>				
Dados da Aplicação							
Curva de conjugado da carga:	<input type="text" value="Parabólico"/>						
Conjugado de partida:	<input type="text"/>	Conjugado nominal (cn):	<input type="text"/>				
Inércia da carga (jcarga):	<input type="text"/>	Gd2 (jcarga/4):	<input type="text"/>				
Recomendações							
Potência (cv):	<input type="text" value="7.5"/>	Polos:	<input type="text" value="08"/>				
Resultados							
 Simulação	 Atribuir potência	 Atribuir potência	 Atribuir potência	 Atribuir potência			
Potências (cv):	<input type="text" value="7.5"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>			

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

3.1.5 Cálculo de Demanda e Consumo do Motor W22 IR2 Plus

A partir de todos os dados fornecidos, o software CEE consegue identificar o motor atual. A partir de um banco de dados interno, é possível analisar o desempenho do motor na figura 24:

Figura 24 - Desempenho do motor W22 IR2 Plus de 7,5 cv

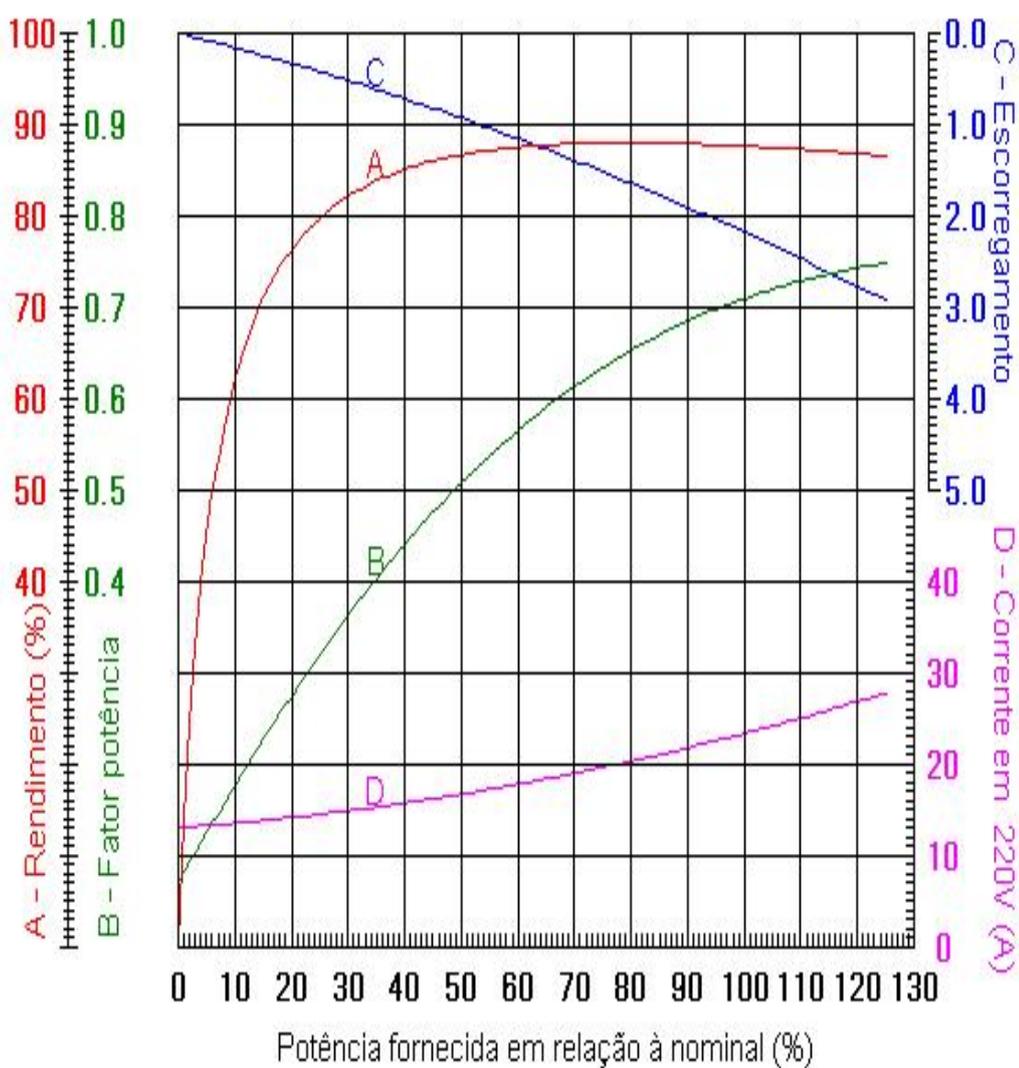
Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Usar Dados de Desempenho?: <input checked="" type="checkbox"/>		Substituir Motor?: <input checked="" type="checkbox"/>					
Rendimento Atual							
50%:	86,5	75%:	88,0	Nominal:	87,5		
Fator de Potência Atual							
Vazio:	0,07	50%:	0,51	75%:	0,63	Nominal:	0,71
Corrente Atual							
Vazio:	7,5	50%:	9,5	75%:	11,3	I nominal:	13,4
Resultados Motor Atual							
Corrente média (a):	13,4	Tensão média (v):	380,0				
% carga:	99,9	Rendimento:	87,5				
Fator de potência:	0,71	Torque nominal (kgfm):	6,12				
Hop/ano fora ponta:	7665,0	Hop/mês fora ponta:	638,75				
Hop/ano ponta:	1095,0	Hop/mês ponta:	91,25				
Consumo vent forçada (kw):	0,0	Demanda por motor (kw):	6,28				
Hop/ano:	8760,0	Demanda total (kw):	6,28				
Kwh/ano:	55012,8						

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

O software possui o próprio banco de dados interno com todas as características do motor em questão. Para os cálculos, são considerados os valores de acordo com as curvas de desempenho do W22 IR2 Plus de 7,5 cv, especificadas no gráfico 12:

Gráfico 12 - Curvas de desempenho motor IR2 Plus de 7,5 cv

Curvas de Desempenho

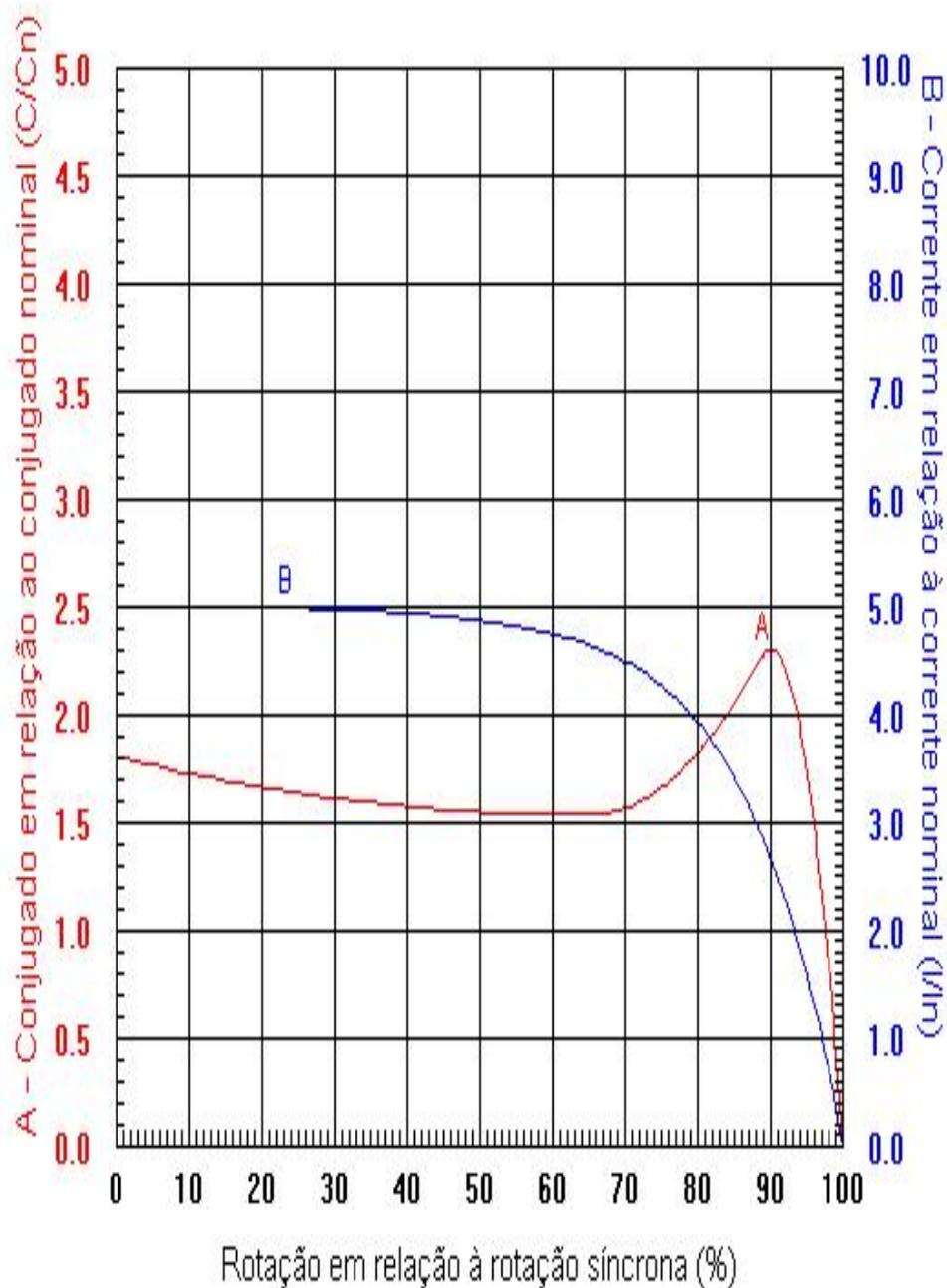


Fonte: WEG, 2018.

O motor IR2 Plus de 7,5 cv também possui curvas de conjugado e corrente, ambos de valores instantâneos em relação aos valores nominais. O comportamento de cada uma das curvas é mostrado no gráfico 13, conforme a rotação aumenta:

Gráfico 13 - Curvas de conjugado e corrente do motor IR2 de 7,5 cv

Curvas de Conjugado e Corrente



Fonte: WEG, 2018.

Para cada porcentagem de uso da potência do motor, há um valor de rendimento, de corrente e de fator de potência. É notável que quanto mais perto do valor nominal for o da potência utilizada pelo motor, maiores serão seu rendimento, fator de potência e corrente (WEG, 2016). Nesse caso, o sistema de partida é do tipo direta e o acionamento da carga utiliza 100% da potência do motor, mais precisamente 5,5 kW.

O motor opera durante o dia todo (24 horas) e sem paradas no ano (365 dias por ano). Então, a máquina elétrica opera em 100% do tempo na ponta e fora da ponta. O valor da tarifa nesse caso é de R\$ 0,44/kWh tanto fora quanto na ponta.

Pode-se calcular a demanda do motor com os dados conhecidos, a partir da fórmula 8, sabendo-se que a tensão em uso do motor é de 380 V, a corrente nominal média é de 13,4 A e o fator de potência em plena carga é de 0,71, a potência elétrica absorvida da rede pelo motor é de:

$$P_e = 6,26 \text{ kW.}$$

O cálculo para definir o consumo do motor no período de um ano é descrito na fórmula 17:

$$C_o = \frac{P_{mec} \cdot \%Carga \cdot Horas \cdot Dias}{\eta(\%)} \quad (\text{kWh}) \quad (17)$$

Onde:

C_o = Consumo total em um ano (kWh);

P_{mec} = Potência nominal do motor (kW);

$\%Carga$ = Porcentagem de carga a ser acionada pelo motor;

Horas = Quantidade de horas por dia em que o motor opera (h);

Dias = Quantidade de dias por ano em que o motor opera;

η (%) = Rendimento do motor de acordo com a porcentagem de carga;

O motor possui uma potência nominal de 5,5 kW, e opera com 100% de carga, 365 dias por ano e 24 horas por dia. O rendimento da máquina em plena carga é de

87,5%, de acordo com a figura 24. A partir desses dados, é possível determinar o consumo anual do motor a partir da fórmula 17:

$$C_o = 55.062,86 \text{ kWh.}$$

Nesse ponto, fica determinado o valor de consumo do motor de 7,5 cv acionado por partida direta. O custo total anual (C_t) desse consumo é o produto entre C_o e da tarifa de energia, a qual é de R\$ 0,44/kWh. Então, C_t é:

$$C_t = \text{R\$ } 24.227,66.$$

3.1.6 Motor Elétrico W22 IR3 Premium

As características gerais do motor proposto estão representadas na figura 25:

Figura 25 - Características do W22 Premium IR3 de 7,5 cv

Carcaça	160M	Momento de inércia (J)	0.1756 kgm ²
Potência	5.5 kW (7.5 HP-cv)	Categoria	N
Número de polos	8	Classe de isolamento	F
Frequência	60 Hz	Fator de serviço	1.25
Rotação nominal	880 rpm	Elevação de temperatura	80 K
Escorregamento	2.22 %	Regime de serviço	S1
Tensão nominal	220/380/440 V	Método de partida	Partida direta
Corrente nominal	22.6/13.1/11.3 A	Temperatura ambiente	-20°C a +40°C
Corrente de partida	113/65.4/56.5 A	Altitude	1000 m
I _p /I _n	5.0	Grau de proteção	IPW55
Corrente a vazio	14.0/8.11/7.00 A	Refrigeração	IC411 - TFVE
Conjugado nominal	6.09 kgfm	Forma construtiva	B3D
Conjugado de partida	200 %	Sentido de rotação ¹	Ambos
Conjugado máximo	250 %	Nível de Ruído ²	54.0 dB(A)
Tempo de rotor bloqueado	64s (frio) 36s (quente)	Massa aproximada ³	131 kg

Fonte: WEG, 2018.

O motor possui 8 polos, com velocidade nominal de 880 rpm. A intenção da utilização do inversor de frequência é variar esta velocidade de acordo com a temperatura desejada.

O motor proposto é pintado na cor verde e está representado na figura 26:

Figura 26 - Motor W22 IR3 Premium de 7,5 cv

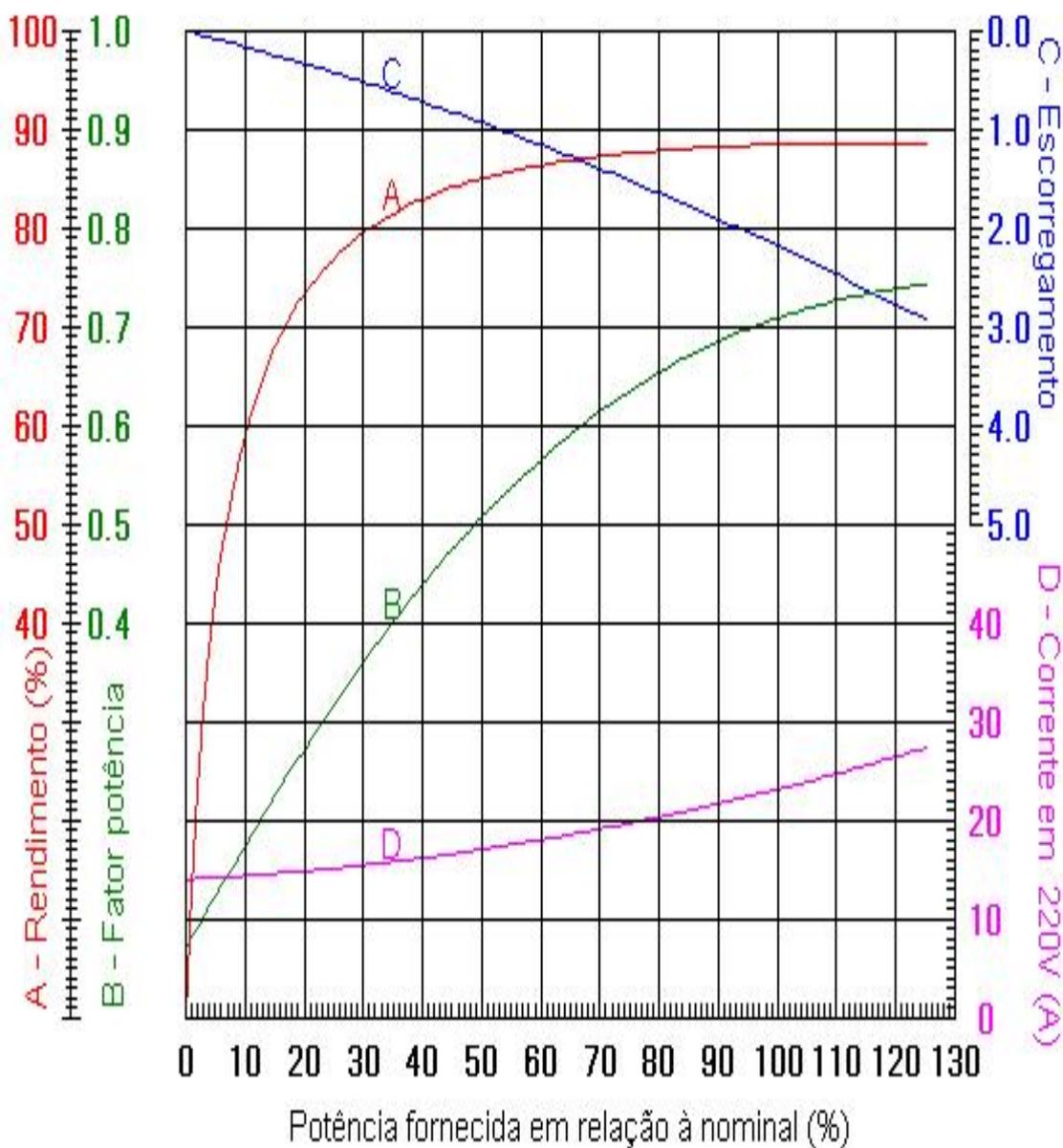


Fonte: WEG, 2018.

A curva de desempenho do motor W22 IR3 Premium, carcaça 160M, potência de 7,5 cv e 8 polos é mostrada no gráfico 14:

Gráfico 14 - Curvas de desempenho do motor IR3 Premium de 7,5 cv

Curvas de Desempenho



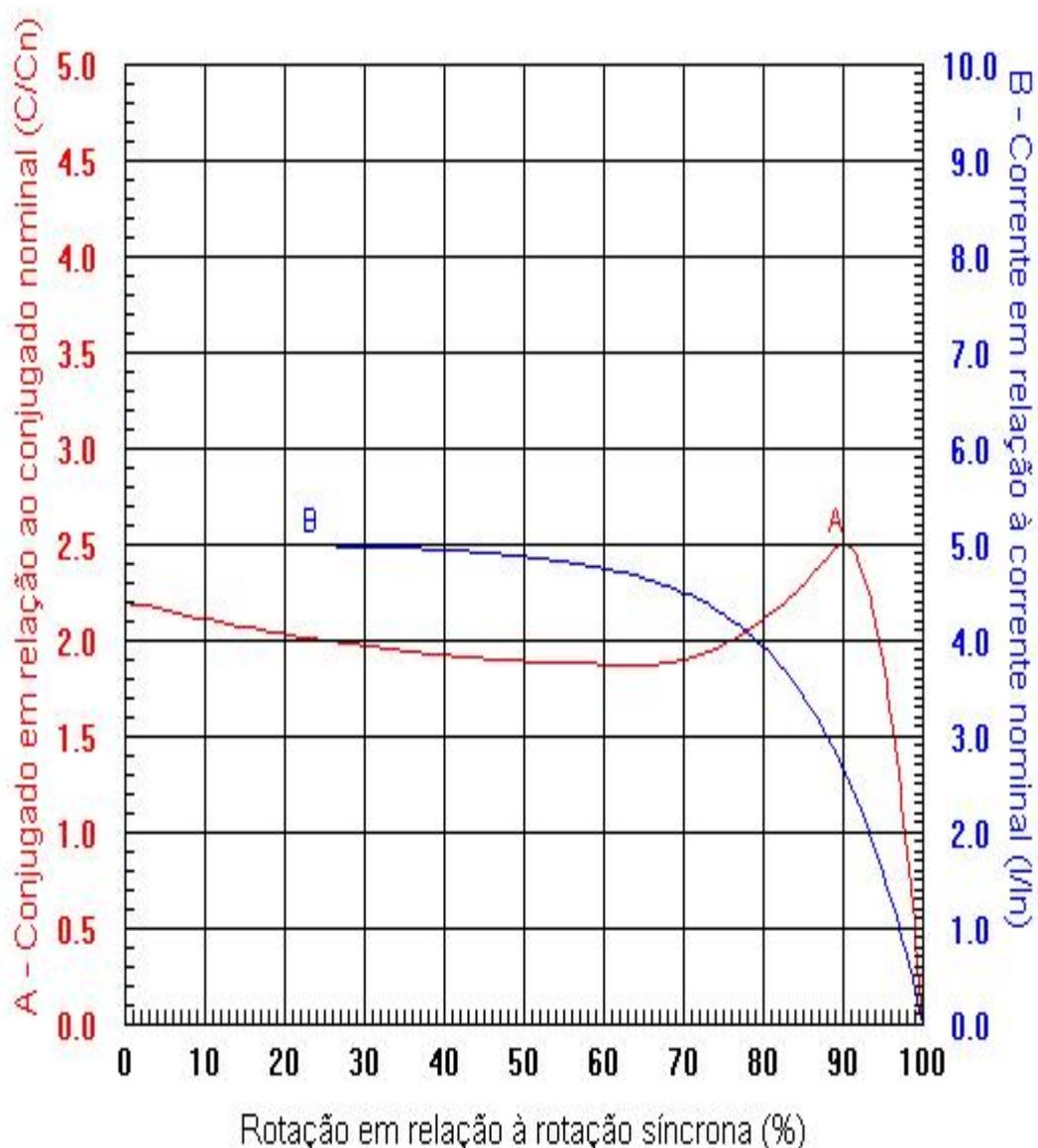
Fonte: WEG, 2018.

A curva de corrente no gráfico é destinada a tensão de 220 volts. A tensão utilizada nesse caso é de 380 volts, então a corrente deve ser multiplicada por 0,578 (WEG, 2016).

As curvas de conjugado e de corrente em relação a velocidade de rotação são apresentadas no gráfico 15:

Gráfico 15 - Curvas de conjugado e corrente do motor IR3 Premium de 7,5 cv

Curvas de Conjugado e Corrente

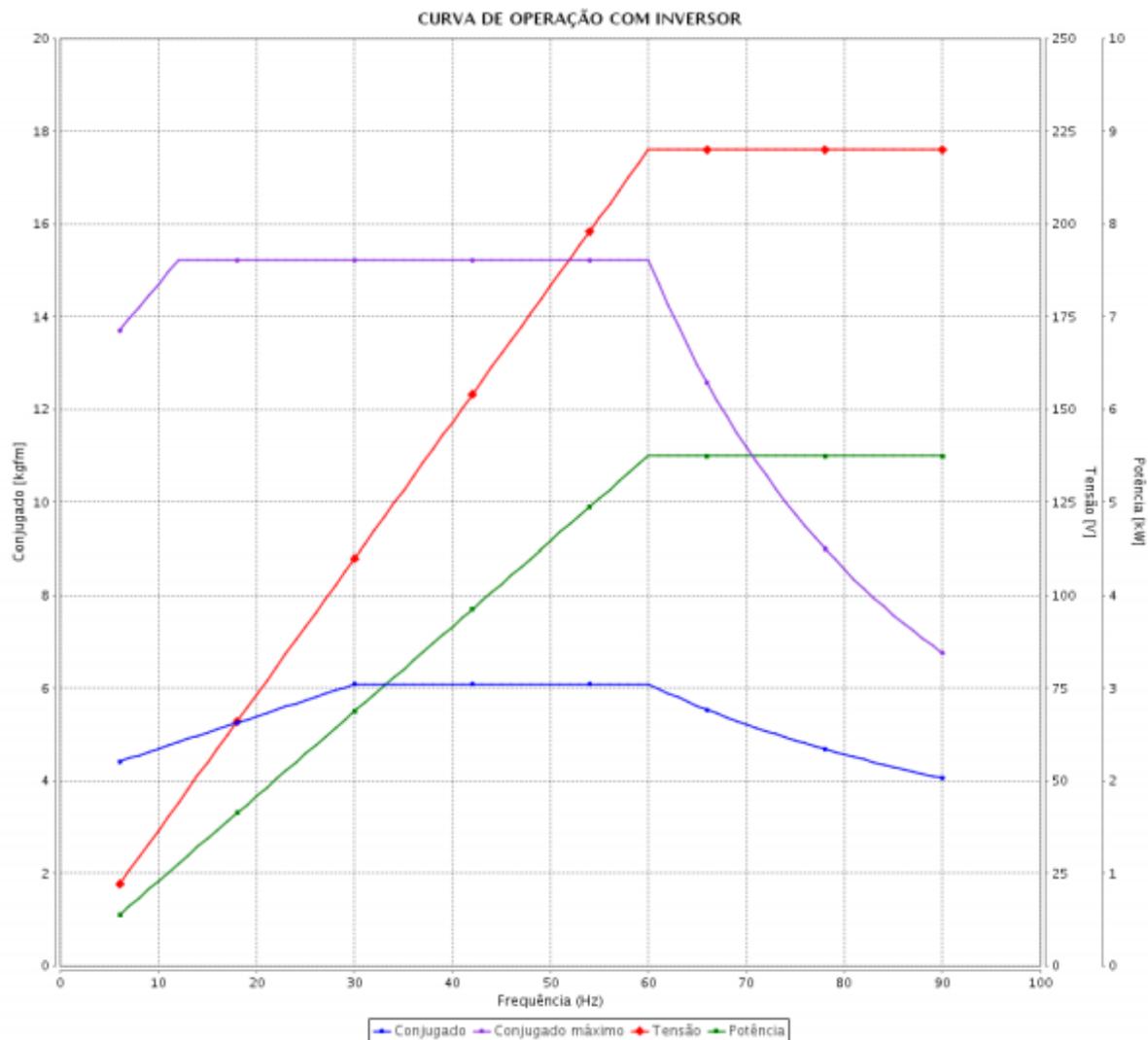


Fonte: WEG, 2018.

As curvas representadas no gráfico 15 indicam a porcentagem de conjugado em relação ao conjugado nominal e a porcentagem de corrente em relação a corrente nominal do motor (WEG, 2018). Por exemplo, quando o motor atinge 60% de velocidade em relação à síncrona, a corrente é aproximadamente $4,7 \times I_n$.

As curvas do motor W22 IR3 Premium com a utilização do inversor de frequência encontram-se destacadas no gráfico 16:

Gráfico 16 - Curvas de operação com inversor de frequência do motor IR3 Premium de 7,5 cv



Fonte: WEG, 2018.

Onde:

- A curva azul representa o conjugado do motor, que permanece praticamente constante entre 30 e 60 Hz;
- A curva verde representa a variação da potência em relação a frequência;
- A curva vermelha representa a variação da tensão em relação a frequência;

Os valores de rendimento, corrente nominal e fator de potência para cada porcentagem de carga são obtidos a partir do gráfico 14, e ficam representados na tabela 4:

Tabela 4 – Características conforme porcentagem de carga do motor IR3 Premium de 7,5 cv

% da Carga	Rendimento (%)	Fator de Potência	Corrente (A)
50%	85	0,51	9,86
75%	87,5	0,63	11,41
100%	89,8	0,71	13,1

Fonte: WEG, 2018.

3.1.7 Cálculo da Demanda e Consumo do Motor W22 IR3 Premium

A partir de tais dados, é possível calcular a demanda dos motores propostos, mantendo-se a tensão em 380 V, a corrente em plena carga é de 13,1 A, e o fator de potência é de 0,71, de acordo com a tabela 4. O rendimento do motor nesse caso é de 89,8%.

A demanda de cada motor pode ser calculada através da fórmula 8:

$$P_e = 6,121 \text{ kW.}$$

A diferença entre os motores IR2 e IR3 é de 0,139 kW. De acordo com a fórmula 17, o consumo anual do motor IR3 Premium será de:

$$C_o = 54.502,26 \text{ kWh.}$$

O consumo foi calculado em condições de plena carga, na tensão de alimentação de 380 V com operação 24 horas por dia em 365 dias por ano.

O custo total do consumo anual com a tarifa de R\$ 0,44/kWh é de:

$$C_t = \text{R\$ } 23.980,99.$$

A diferença do custo total do consumo anual do sistema atual para o sistema proposto é de R\$ 246,67, que é a economia anual. O custo de aquisição de um motor novo W22 IR3 Premium com potência de 7,5 cv é de R\$ 5.163,49. O payback seria

de mais de 20 anos, devido ao fato de que os níveis de rendimento IR2 e IR3 são próximos, então a diferença de consumo ainda não é grande. Porém, a ideia central do trabalho é estudar a variação de velocidade do motor, sem que ele precise usar 100% de sua potência nominal durante todo o tempo.

3.1.8 Cálculo de Demanda e Consumo com Inversor de Frequência

O próximo passo é analisar o funcionamento do motor no acionamento de diferentes porcentagens de carga durante o dia. O cálculo de demanda com a utilização do inversor de frequência é realizado conforme a fórmula 18:

$$P_{\text{Inv}} = \frac{C \cdot n}{974 \cdot \eta} \cdot \% \text{carga} \quad (\text{kW}) \quad (18)$$

Onde:

P_{Inv} : Demanda utilizando inversor de frequência (kW);

C: Torque do motor necessário para a porcentagem de carga (kgfm);

n: Velocidade de rotação do motor para a porcentagem de carga (rpm);

η : Rendimento do inversor de frequência;

O consumo anual do acionamento do motor através de inversor de frequência é calculado segundo a fórmula 19:

$$C_{\text{Inv}} = \frac{C \cdot n}{974 \cdot \eta} \cdot n^{\circ} \text{ de horas} \cdot n^{\circ} \text{ de dias} \cdot \% \text{carga} \quad (\text{kWh}) \quad (19)$$

Onde:

C_{Inv} : Consumo anual com acionamento por inversor de frequência (kWh);

C: Torque do motor necessário para a porcentagem de carga (kgfm);

n: Velocidade de rotação do motor para a porcentagem de carga (rpm);

η : Rendimento do inversor de frequência;

n° de horas: Número de horas por dia de operação (h);

n° de dias: Número de dias por ano de operação (dias);

Não é possível ter precisão da velocidade do motor em cada hora do dia, apenas com medição adequada com o sistema proposto já instalado. A solução é realizar uma estimativa e calcular uma média ponderada para a velocidade e para o torque. Com certeza os ventiladores não irão operar em 100% de carga na maior parte do tempo, então, obviamente o consumo será menor.

O motor proposto será um modelo W22 IR3 Premium da WEG, e seu nível de rendimento é o IR3, o qual excede o nível mínimo exigido pela Portaria Interministerial nº1 de junho de 2017 (MME, 2017). O método de partida proposto será com inversor de frequência para controle de velocidade, de acordo com todos os dados já fornecidos ao software CEE e também sugerindo o modelo de motor que será utilizado, o resultado fica de acordo com a figura 27:

Figura 27 - Resultados apresentados pelo software

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira
Recomendado							
Usar Dados de Desempenho: <input checked="" type="checkbox"/>		Copiar Dados Motor Atual: <input type="checkbox"/>					
Especificação: W22 PREMIUM							
Potência recomendada (cv): 7,5		Potência recomendada (kw): 5,5					
Polos: 08		Carcaça: 160M					
Rendimento Recomendado							
50%: 85,0		75%: 87,5		Nominal: 88,4			
Fator de Potência Recomendado							
Vazio: 0,07		50%: 0,51		75%: 0,63		Nominal: 0,71	
Corrente Recomendada							
Vazio: 8,1		50%: 9,6		75%: 11,3		I nominal: 13,3	
Resultados Motor Recomendado							
Tensão base recomendada: 440,0		Rotação (rpm): 880,0					
% carga: 81,9		Rendimento: 85,1					
Fator de potência: 0,66		Torque nominal (kgfm): 6,09					
Hop/ano fora ponta: 7665,0		Hop/ mês fora ponta: 638,75					
Hop/ano ponta: 1095,0		Hop/mês ponta: 91,25					
Consumo vent forçada (kw):		Demanda por motor (kw): 4,75					
Hop/ano: 8760,0		Demanda total (kw): 4,75					
Kwh/ano: 41610,0							

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

O motor recomendado é o W22 IR3 Premium, e seu acionamento se dará a partir de um inversor de frequência. Então, não será acionada 100% da carga na maior parte do tempo. Na verdade, a ideia é não acionar 100% de carga em nenhum momento. A velocidade média do motor foi estimada em 53,9 Hz, de acordo com a figura 19, a partir dessa informação, o software avalia que a média de carga acionada será de 81,9%. Já que o ventilador é um tipo de carga quadrática, o conjugado requerido do motor varia proporcionalmente de acordo com o quadrado da velocidade, e a potência, de acordo com o cubo da velocidade (WEG, 2016).

A tensão recomendada pelo software será sempre de 440 volts, mas esse fator não possui importância, já que a corrente e a tensão variam proporcionalmente, então pode-se utilizar a tensão em 380 volts que o resultado do cálculo da demanda será o mesmo, já que o fator de potência varia apenas com a porcentagem de carga.

O controle utilizado no inversor para a aplicação é do tipo escalar. Como já mencionado anteriormente, nesse caso a tensão e a frequência variam proporcionalmente. Se a tensão em 60 Hz é de 380 V, então a tensão em 53,9 Hz é de 341,37 V. O torque tende a ser constante até atingir a frequência nominal, então em 53,9 Hz o conjugado é nominal, com o valor de 6,09 kgmf de acordo com a figura 27. Levando-se em conta que o conjugado médio "C" é de 6,09 kgmf, a velocidade em 81,9% de carga possui escorregamento de 0,018, de acordo com o gráfico 14. Para esse escorregamento, pode-se calcular a velocidade nominal do motor de acordo com a fórmula 2, sendo a velocidade síncrona 900 rpm. A velocidade nominal para a porcentagem de carga acionada é de 883,8 rpm. O rendimento do inversor é de 0,98, a demanda do motor utilizando acionamento por inversor é dada pela fórmula 18:

$$P_{Inv} = 4,7645 \text{ kW.}$$

O resultado do cálculo foi de 4,7645 kW, enquanto o resultado no software é de 4,75 kW. Isso prova que o software possui mais recursos em seu banco de dados e não considera o conjugado constante ao longo do tempo, por exemplo. Para o valor real do consumo, apenas realizando medição depois de já instalado todo o sistema.

O cálculo de consumo anual do motor é realizado a partir da fórmula 19, que é basicamente o produto da demanda, calculada através da fórmula 18, pelo número de

horas de operação diária, que no caso é de 24 horas e também pelo número de dias em operação no ano, no caso 365 dias.

O consumo anual é de:

$$Co_{Inv} = 41.737,01 \text{ kWh.}$$

De acordo com a simulação realizada com acionamento por inversor de frequência na figura, o consumo de energia com o novo sistema será de $Co = 41.610,00$ kWh por ano. O valor da tarifa é de R\$ 0,44/kWh, então o custo total anual será de:

$$Ct = R\$ 18.364,28.$$

3.1.9 Investimentos

Os investimentos necessários para a instalação compreendem os seguintes fatores:

- Aquisição do motor elétrico W22 IR3 Premium;
- Aquisição do inversor de frequência próprio para o motor;
- Aquisição do transdutor de temperatura;

Os preços e descontos aplicados encontram-se na tabela 5:

Tabela 5 - Relação dos custos de cada componente do sistema proposto

MATERIAL	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO CONJUNTO
Motor elétrico W22 IR3 Premium	R\$ 4.938,99	1	R\$ 4.938,99
Inversor de frequência CFW500	R\$ 1.800,00	1	R\$ 1.800,00
Transdutor de temperatura	R\$ 200,0	1	R\$ 200,00

Fonte: O AUTOR, 2018. Créditos: C.O. Mueller motores e bombas LTDA.

3.1.10 Cálculo do Payback

O custo total da aquisição de todos os materiais é de R\$ 6.938,99. O custo total anual do consumo com acionamento através de inversor de frequência é de R\$ 18.364,28. Tendo em vista que o custo total do sistema com motor W22 IR2 Plus é de R\$ 24.227,66 por ano, a economia anual nesse caso é de:

$$\text{Economia} = 24.227,66 - 18.364,28.$$

$$\text{Economia} = \text{R\$ } 5.863,38/\text{ano}.$$

O payback é calculado a partir dos valores de investimento do sistema proposto e da economia gerada pelo mesmo, de acordo com a fórmula 20:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Economia}} \quad (20)$$

Onde:

Payback: Número de anos para retorno do investimento (anos);

Investimento: Verba utilizada para implantar o sistema (R\$);

Economia: Economia anual do sistema proposto (R\$/ano);

Nesse caso, os valores são:

Investimento = R\$ 6.938,99;

Economia = R\$ 5.863,38/ano.

De acordo com a fórmula 20, o payback será de:

$$\text{Payback} = 1,18 \text{ anos}.$$

O payback será de aproximadamente 1 ano e 2 meses, um período considerado viável, já que a redução do consumo de energia continuará após esse período.

O resultado do software é mostrado na figura 28:

Figura 28 - Análise financeira

Dados do Motor	Detalhes Técnicos	Método de Partida	Acoplamento	Detalhes do Regime	Redimensionamento	Desempenho	Análise Financeira	
Energia								
Kw evitado ponta:		1,53		Kw evitado fora ponta:		1,53		
Economia ponta (kwh/ano):		1675,35		Economia fora ponta (kwh/ano):		11727,45		
Economia ponta (kwh/mês):		139,61		Economia fora ponta (kwh/mês):		977,29		
Economia (kwh/ano):		13402,8		Economia (kwh/mês):		1116,9		
Investimento Motores								
Usar investimento calculado?: <input checked="" type="checkbox"/>				Validar Especificações?: <input type="checkbox"/>				
Preço bruto c/ icms (\$):		7483,32		Opcionais (\$):		0,0		
Desconto adicional (%):		34,0		Investimento motor (\$):		4938,99		
Investimento Acionamento e Instalação								
Considerar Acionamento?: <input checked="" type="checkbox"/>				Quantidade:				1,0
Preço bruto acionamento (\$):		2000,0		Custo com instalação (\$):		0,0		
Investimento acionamento:		2000,0						
Retorno Financeiro								
Economia (\$/ano):		5897,23		Economia (\$/mês):		491,44		
Economia %:		24,4		Investimento total (\$):		6938,99		
Payback (anos):		1,18		Payback:		1 A e 2 M		

Fonte: Imagem da tela do software CEE da WEG.

O resultado dos cálculos foi o mesmo resultado apresentado pelo software.

3.2 INVERSOR CFW500

O inversor que será proposto para a aplicação é o CFW500 e o mesmo está representado na figura 29:

Figura 29 - Inversor de frequência CFW500 para motor de 7,5 cv



Fonte: WEG, 2018.

O CFW500 possui todas as características de controle citadas anteriormente, e também possui um modelo próprio para acionar um motor de 7,5 cv na tensão de 380 V. As especificações do drive específico para a aplicação encontram-se na figura 30:

Figura 30 - Características técnicas do CFW500 para motor de 7,5 cv

Resumo das características técnicas			
Tensão nominal de entrada	380-480 V	Filtro RFI	Sem filtro
Número de Fases de entrada	Trifásico	Grau de proteção	IP20
Configuração	Com opcionais	Frenagem reostática	Standard com frenagem
Corrente nominal (ND)	10 A	Alimentação da eletrônica	Não Disponível
Corrente nominal (HD)	10 A		

Fonte: WEG, 2018.

Outras características como o rendimento do inversor, que foi utilizado para os cálculos de consumo, encontram-se na figura 31:

Figura 31 - Especificações técnicas do inversor CFW500 para motor de 7,5 cv

Métodos de Controle	V/f (escalar) e VVW	Porta USB	Somente com plug-in
Rendimento típico na condição nominal	≥ 97%	Cartão de memória	Não incluso no produto
Indutor do Link	Não	E/S padrão	4 x DI; 1 relé NA/NF e 1 transistor x DO; 1 x AI; 1 x AO.
Conformal Coating	3C2	Parada de segurança	Não Disponível
SoftPLC	Sim, incorporado	Display	LCD Numérico
Temperatura	-10 °C a 50 °C		

Fonte: WEG, 2018.

O rendimento especificado do inversor CFW500 é de no mínimo 97%. Para fins de cálculo, foi utilizado o valor de 98%, que está na faixa de valores correta (WEG, 2018).

3.2.1 Parametrização do Inversor de Frequência

A parametrização do inversor de frequência deve garantir o funcionamento do controlador PID, já que o mesmo realizará o controle de velocidade do motor. Os parâmetros relevantes para tal processo são explícitos e detalhados na tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros para o PID

Parâmetro	Ajuste	Descrição
P100	3	Rampa de aceleração.
P133	25 Hz	Velocidade mínima do inversor.
P134	55 Hz	Velocidade máxima do inversor.
P203	1	Função habilitar PID, sinal do transdutor alimentado em AI1.
P209	11	Unidade de referência em °C.
P217	30 Hz	Frequência para entrar no modo sleep.
P218	2	Tempo para entrar no modo sleep, em segundos.
P220	1	Controle remoto.
P233	1	Sinal de entrada da AI1: 4 a 20mA.
P263	7	Entrada DI1 configurada para desligar.
P264	6	Entrada DI3 configurada para ligar.
P265	22	Entrada DI3 configurada para manual/automático.
P520	2000	Ganho proporcional do PID, para controle de temperatura.
P521	0,040	Ganho integral do PID, para controle de temperatura.
P522	0	Ganho diferencial do PID, para controle de temperatura.
P525	50%	Setpoint do PID, via IHM.
P527	1	Tipo de ação do PID, reverso para o caso do controle de temperatura.
P535	1%	Faixa para acordar.

Fonte: WEG, 2011.

De acordo com a tabela 6, a velocidade mínima do inversor foi padronizada para 25 Hz, já que uma velocidade menor que essa não faria grande diferença no processo. A velocidade máxima não deve ser igual à nominal do inversor, já que esse fato não agregaria economia no consumo de energia. A velocidade foi implantada em 55 Hz, já que um valor acima da velocidade média do inversor, que é de 53,9 Hz. A ideia é o motor não operar em 100% de velocidade em nenhum instante. A frequência para o inversor entrar no “modo sleep” deve ser um pouco maior que a frequência mínima (WEG, 2011). O drive entra no modo dormir quando sua velocidade é tão baixa que já não faz mais diferença no processo. Nesse caso, o valor determinado foi 30 Hz.

Os valores que a WEG sugere para o controle de PID estão na tabela 7:

Tabela 7 - Valores para os ganhos do PID

Tabela 13.2: Sugestões para ajuste dos ganhos do regulador PID

Grandeza	Ganhos		
	Proporcional P0520	Integral P0521	Derivativo P0522
Pressão em sistema pneumático	1.000	0.430	0.000
Vazão em sistema pneumático	1.000	0.370	0.000
Pressão em sistema hidráulico	1.000	0.430	0.000
Vazão em sistema hidráulico	1.000	0.370	0.000
Temperatura	2.000	0.040	0.000
Nível	1.000	Consulte a nota	0.000

Fonte: WEG, 2011.

No caso da torre de resfriamento, o controle é de temperatura. Segundo os valores sugeridos pela WEG, os ganhos proporcional, integrativo e derivativo são, respectivamente, 2.000, 0,040 e 0 (WEG, 2011).

O setpoint do processo é basicamente o valor de temperatura que o inversor deve manter sempre. No caso desse trabalho, o setpoint é 25°C, ou seja, a temperatura da água deve ser de 25°C quando a mesma sair da torre de resfriamento. Para a parametrização, o valor deve ser dado em porcentagem de acordo com a faixa de valores que o termopar reserva. O termopar acoplado ao transdutor possui uma faixa de 0 a 50°C, então, se o valor desejado é de 25°C, o parâmetro P525 deve ter o valor de 50%, exatamente na metade da faixa de valores (WEG, 2011).

O parâmetro P233 recebe a informação de que o sinal analógico será de 4 a 20 mA, o valor 1 determina esse funcionamento. Os parâmetros P263, P264 e P265 são os responsáveis pelo acionamento e desligamento do motor através de botões remotos, e para que o inversor funcione de forma automática (WEG, 2011).

O tipo de ação do PID nesse caso é reverso, devido ao fato de que a temperatura reduz conforme a velocidade do motor aumenta (WEG, 2011).

4 CONCLUSÃO

Após a realização do estudo de eficiência energética para o motor da torre de resfriamento, foram constatados os resultados contidos na tabela 8:

Tabela 8 - Comparação de consumo e custos entre os motores

	Demanda	Consumo anual	Custo do consumo anual
	(kW)	(kWh)	(R\$)
Motor IR2 Plus	6,26	55.062,86	24.227,66
Motor IR3 Premium	6,121	54.502,26	23.980,99
Motor IR3 Premium c/inversor	4,7645	41.737,01	18.364,28

Fonte: O AUTOR, 2018.

Nota-se que a diferença de demanda entre os motores IR2 e IR3 é muito pequena, apenas 0,139 kW, uma redução de somente 2,2% de potência absorvida da rede. A pequena diferença se deve ao fato de que o motor IR2 Plus possui valor de rendimento próximo ao do motor IR3 Premium. A diferença de custo de consumo de energia entre os dois motores é de apenas R\$ 246,67 por ano, ou seja, praticamente 1% de redução do valor cobrado anualmente.

Tendo em vista os fatos citados acima, fica claro que a utilização do inversor de frequência para controlar a potência absorvida da rede é essencial. Levando-se em consideração o sistema atual, com o motor IR2 Plus, e o sistema proposto com o inversor CFW500 e motor IR3 Premium, a diferença de demanda é de 1,496 kW. Vale ressaltar que é um valor de redução de demanda mais de 10 vezes superior que o calculado entre os dois motores com partida direta. A redução de potência consumida da rede é de 24% nesse caso. Com relação ao custo do consumo, a redução é de R\$ 5.863,38 por ano, o equivalente a 24% de diminuição no preço pago anualmente.

O valor de aquisição do motor IR3 Premium, inversor de frequência CFW500 elétrico e transdutor de pressão, é de R\$ 6.938,99. Como a economia anual com esse sistema é de R\$ 5.863,38, o retorno do investimento será de 1 ano e 2 meses.

O payback é considerado viável, já que o mesmo ocorre em curto prazo. O payback seria viável até um tempo de 2 anos de retorno. Além disso, um motor com 7 anos de utilização vai apresentar problemas com mais facilidade e constância se comparado com um motor novo e com rendimento maior. Quanto maior a idade do motor, maior é a necessidade de manutenção do mesmo.

Para que o cálculo de operação com inversor de frequência esteja correto, é importante realizar a parametrização correta do controle PID, já que o mesmo é responsável por indicar a rotação correta do motor para cada estado de temperatura. Conforme descrito no capítulo 3, a parametrização desenvolvida proporcionará o consumo de energia elétrica calculado com a utilização do inversor de frequência.

O sistema de acionamento com inversor de frequência não só reduz o consumo de energia, como também auxilia no momento da partida do motor. Em sistemas com partida direta, a corrente de partida é de 5 a 6 vezes maior que a corrente nominal do motor, conseqüentemente há um pico de corrente elétrica na rede, além de uma grande queda de tensão (WEG, 2016). O acionamento por inversor de frequência possibilita a parametrização de uma rampa de aceleração do motor elétrico, na qual a partida será suave até a estabilização.

É importante ressaltar que o estudo de eficiência energética não visa somente a redução das despesas de uma indústria. Outro fator a ser levado em consideração é o desperdício desnecessário de energia elétrica. Quanto maior o desperdício, maior é a quantidade de energia que deve ser produzida, então são necessárias mais usinas geradoras, maiores impactos ambientais e aumento da tarifa de energia.

REFERÊNCIAS

- ABESCO. **O que é Eficiência Energética? (EE)**. 2015. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em 13 de maio de 2018.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA No 569, DE 23 DE JULHO DE 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/resultado/ren2013569.pdf>>. Acesso em 28 de maio de 2018.
- BEN. **Balanco energético nacional**. 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.
- BORTONI, E.C. & SANTOS. **A.H.M. Acionamentos com Motores de Indução Trifásicos**. In **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.
- COPEL. **Informações úteis**. 2017. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fb2f4a2f0687eb6cf03257488005939b9>>. Acesso em: 30 de março de 2018.
- FERREIRA, C. A. C. **Análise Técnico-Econômica de Motores de Indução Trifásicos Utilizando-se os Programas Computacionais BD Motor e Motor Master+International**. Orientador: Carlos Aparecido Ferreira. 2015, 110f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, 2015.
- FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr; UMANS S. D. **Máquinas Elétricas – com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. New York: Bookman, 2006.
- GOMES, S. R. **Máquinas Elétricas I**. 2015. Disponível em: <<http://maquinaseletricasi.blogspot.com/2016/03/manutencao-industrial-aula-11-inspecao.html>>. Acesso em 2 de junho de 2018.
- INMETRO. **Portaria interministerial nº553, de 8 de dezembro de 2005**. 2005. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/qualidade/pdf/Portaria_MME_MCT_MDIC_553-2005\[1\].pdf](http://www.inmetro.gov.br/qualidade/pdf/Portaria_MME_MCT_MDIC_553-2005[1].pdf)>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.
- LENZ, A. L. **Conjugado, Potência e Velocidade em Máquinas Elétricas**. 2014. Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2014/07/conjugado-potencia-e-velocidade-em.html>>. Acesso em 28 de maio de 2018.
- LENZ, A. L. **Veículos elétricos – Os Carros Verdes – Emissão “Zero” de Carbono – Tecnologias e Empreendimentos**. 2013. Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2013/03/>>. Acesso em 25 de março de 2018.
- MME. **PORTARIA INTERMINISTERIAL No - 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017**. 2017. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/Portaria+Interministerial+n+012017.pdf/943cf542-c207-4a8f-88ce-ff8223d949ad>>. Acesso em 23 de maio de 2018.

NOVUS. **Série SPH – Sensores com Cabeçote de Proteção. 2018.** Disponível em: <https://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaoID=400154&SubsecaoID=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=926362&Idioma=55>. Acesso em 28 de maio de 2018.

O GLOBO. **Da falta de estrutura fez-se a ‘crise do apagão’ no Brasil do início do século XXI. 2013.** Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/fatos-historicos/da-falta-de-estrutura-fez-se-cri-se-do-apagao-no-brasil-do-inicio-do-seculo-xxi-9396417>>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.

PINTO, Tales dos Santos. **O apagão energético de 2001; *Brasil Escola. 200-?*** Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/historiab/apagao.htm>>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.

PLANALTO. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. 2001.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10295.htm#art2>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.

PLANALTO. **Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002. 2002.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4508.htm>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.

PORTAL DA ELETRICIDADE. **O triângulo das potências. 2017.** Disponível em: <<https://universoeletrica.blogspot.com.br/2017/02/o-triangulo-das-potencias.html>>. Acesso em 24 de março de 2018.

PORTAL DO ELETRICISTA. **MOTOR DE INDUÇÃO – SIGNIFICADO, FUNCIONALIDADE, DICAS, PASSO A PASSO. 2015.** Disponível em: <<http://www.portaleletricista.com.br/motor-de-inducao-funcionalidade-significado-dicas-passo-a-passo/>>. Acesso em 24 de maio de 2018.

PROCEL INFO. **Resultados PROCEL 2014. 2014.** Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/pdf-completo.pdf>>. Acesso em 24 de maio de 2018.

PROCEL INFO. **Selo procel. 2006.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B88A19AD9-04C6-43FC-BA2E-99B27EF54632%7D>>. Acesso em 03 de abril de 2018.

REVISTA TAE. **Água de resfriamento, por quê mantê-la limpa? 2010.** Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/280-noticias>>. Acesso em 25 de março de 2018.

SAGE. **Tabela ICMS 2018 Atualizada com as Alíquotas dos Estados. 2017.** Disponível em: <<https://blog.sage.com.br/tabela-icms-2018-atualizada/>>. Acesso em 29 de maio de 2018.

WEG. **Drives. 2018.** Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW500>>. Acesso em 25 de março de 2018.

WEG. INVERSOR CFW500B10P0T4DB20. 2018. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-OEMs-e-Uso-Geral/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/INVERSOR-CFW500B10P0T4DB20/p/11895185>>. Acesso em: 13 de maio de 2018.

WEG. INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500 – Manual de Programação. 2011. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw500-manual-de-programacao-10001469555-1.1x-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 03 de junho de 2018.

WEG. Manual Geral de Instalação, Operação e Manutenção de Motores Elétricos. 2012. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-iom-general-manual-of-electric-motors-manual-general-de-iom-de-motores-electricos-manual-geral-de-iom-de-motores-electricos-installations-betriebs-und-wartungsanleitung-fur-elektrische-motoren-50033244-manual-english.pdf>>. Acesso em 24 de maio de 2018.

WEG. Motores elétricos - guia de especificação. 2016. Disponível em <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.

WEG. W22 IR3 Premium. 2018. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-IR3-Premium/c/BR_MT_3PHASE_LV_TEFC_W22_IR3>. Acesso em 03 de junho de 2018.

WEG. W22 IR2. 2018. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-IR2/c/BR_MT_3PHASE_LV_TEFC_W22_IR2?h=caefb300>. Acesso em 03 de junho de 2018.