

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**RODOLFO DE OLIVEIRA MARÇANO**

**APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM COMPRESSOR DE AR  
COMPRIMIDO A PISTÃO – COMPRESSOR DE MÉDIO PORTE**

**Varginha**

**2021**

**RODOLFO DE OLIVEIRA MARÇANO**

**APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM COMPRESSOR DE AR  
COMPRIMIDO A PISTÃO – COMPRESSOR DE MÉDIO PORTE**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica sob orientação do Prof. Esp Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

**Varginha**

**2021**

**RODOLFO DE OLIVEIRA MARÇANO**

**APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM COMPRESSOR DE AR  
COMPRIMIDO A PISTÃO – COMPRESSOR DE MÉDIO PORTE**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

---

Prof. Me Eduardo Henrique Ferroni

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os colegas sala do unis e de outras instituições no qual passei esse anos, compartilhando conhecimentos e experiências de vividas no dia-a-dia. Agradeço imensamente aos professores pela compreensão da dificuldade de aprendizado em algum determinado assunto e a sua persistência em ensinar. Agradeço em especial ao meu orientador Roberto Lazarino do Prado Mudesto pela sua dedicação e atenção com esse trabalho. Agradeço a todo minha família pela paciência com a dura caminha para esse objetivo especial dando força de alguma forma, em especial minha Vó Geraldo Borges da Silva que sempre me colocou em suas orações. Agradeço ao meu irmão Raffael de Oliveira Marçano que sempre acreditou em mim, ao seu suporte dado durante o curso nas dificuldade que encontrei. Agradeço aos meus pais Adalberto Candido Marçano e Ana Cristina de Oliveira Marçano que sempre deram suporte necessário para que alcançasse para que posse alcançar esse objetivo. Por fim Agradeço a minha noiva Sabrina de Cassia Manoel com sua paciência e solidariedade contribuiu para que eu nunca desistisse do curso e sempre me colocou para cima com seus conselhos e por me amor nos momentos mais difíceis. Agradeço eternamente a Deus por todas a provações que já enfrentei na vida e venci. Meu sincero agradecimento a todos obrigado.

## RESUMO

Este trabalho apresenta a análise de consumo de energia durante a partida de motor de indução trifásico em um compressor alternativo a pistão. É de grande importância analisarmos a corrente de partida para dimensionar de forma correta os condutores e componentes de partida do motor, o momento de partida de um motor e o período mais crítico. As análises iniciaram em uma indústria de pequeno porte situada em Varginha, sul de Minas Gerais, em um motor de 5 cv para análise. A aplicação de inversor de frequência em compressores de ar comprimido para diminuir a corrente de partida e consequentemente baixar o consumo elétrico do compressor comparado com o método de partida direta. Foram escolhidas duas formas de partida para análise comparativa, a partida direta e com inversor de frequência, assim focamos na corrente de partida e na rampa de partida para não causar danos ao motor de indução trifásico, prolongando a vida útil do mesmo. A tarefa de coletar os dados em cada uma das etapas foi por meio da utilização do equipamento Analisador de Energia e de Qualidade de Energia FLUKE modelo 435. Os objetivos foram alcançados, pode-se destacar a grande redução na corrente de partida utilizando o inversor de frequência para controle na partida do motor de indução trifásico instalado no compressor alternativo a pistão.

**Palavras-chave:** Compressor de ar comprimido. Inversor de frequência. Compressor alternativo a pistão. Partida direta.

## **ABSTRACT**

*This work presents an analysis of energy consumption during the start of a three-phase induction motor in a reciprocating piston compressor. It is of great importance that we analyze the starting current to correctly size the motor starting conductors and components, the starting moment of a motor and the most critical period. The analyzes started in a small industry located in Varginha, in the south of Minas Gerais, in a motor of 5 hp engine for analysis. The application of frequency inverter in compressed air compressors to decrease the starting current and consequently lower the electrical consumption of the compressor compared to the direct starting method. Two ways of starting were chosen for comparative analysis, direct starting and with frequency inverter, so we focused on the starting current and starting ramp so as not to damage the three-phase induction motor, extending the life of the motor. The task of collecting the data in each of the steps was through the use of the FLUKE model 435 Power Quality and Energy Analyzer. The objectives were achieved, it is possible to highlight the great reduction in the inrush current using the frequency inverter to control the starting the three-phase induction motor installed on the reciprocating piston compressor.*

**Keywords:** *Compressed air compressor. Frequency inverter. Reciprocating piston compressor. Direct departure.*

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Continua

DC – Direct Current

MIT – Motor de indução Trifásico

MI – Motor de indução

UNIS-MG – Centro Universitário do Sul de Minas

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Conjugado de um motor de indução .....	16
Equação 2 – Velocidade síncrona.....	16
Equação 3 – Tensão induzida .....	17
Equação 4 – Torque motor de indução .....	18
Equação 5 – Velocidade escorregamento .....	19
Equação 6 – Escorregamento .....	19
Equação 7 – Velocidade mecânica do eixo do motor.....	20
Equação 8 – Frequência do rotor .....	20



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Defasamento motor indução trifásico. ....	14
Figura 2 - Construção de um MIT. ....	15
Figura 3 - Dedução da equação do conjugado em um objeto. ....	16
Figura 4 - Produção de conjugado induzido em um motor de indução. ....	17
Figura 5 - Curva característica Torque/corrente em função da velocidade. ....	23
Figura 6 - Partida direta motor indução trifásico. ....	23
Figura 7 - Diagrama em bloco da Soft-Starter. ....	24
Figura 8 - Forma de onda da Soft-starter. ....	25
Figura 9 - Inversor de frequência. ....	26
Figura 10 - Diagrama em blocos. ....	27
Figura 11 - Blocos de um sistema de ar comprimido. ....	30
Figura 12 - Compressor alternativo a pistão. ....	31
Figura 13 - Pistão em corte. ....	33
Figura 14 - Compressor alternativo a pistão. ....	33
Figura 15 - Admissão de ar. ....	34
Figura 16 - Compressão. ....	34
Figura 17 - Descarga. ....	35
Figura 18 - Expansão. ....	35
Figura 19 - Corte de um compressor rotativo a parafuso. ....	36
Figura 20 - Compressor rotativo a parafuso. ....	36
Figura 21 - Rebitadeira pneumática. ....	38
Figura 22 - Router CNC (Nina Gold Plus). ....	39
Figura 23 - Compressor de ensaio. ....	39
Figura 24 - Diagrama elétrico painel de comando compressor. ....	40
Figura 25 - Quadro de partida. ....	41
Figura 26 - Diagrama de instalação. ....	42
Figura 27 - Quadro geral. ....	42
Figura 28 - Fluke 435 medido qualidade de energia. ....	43
Figura 29 - Compressor e inversor de frequência. ....	44
Figura 30 - Inversor conectado ao motor. ....	44
Figura 31 - Acionamento inversor. ....	45
Figura 32 - Resumo Partida direta. ....	47

Figura 33 - Corrente de Pico Partida Direta. ....	48
Figura 34 - Corrente nominal. ....	49
Figura 35 - Informações da configurações. ....	50
Figura 36 - Corrente partida com inversor de frequência.....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre tipos de controle de inversor de frequência e conversores CA/CC. .....	29
Quadro 2 - Comparativo compressor Parafuso e Pistão. ....	37
Quadro 3 - Parâmetros do motor. ....	45
Quadro 4 - Parâmetros para partida. ....	46
Quadro 5 - Custo de aquisição.....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MOTORES ELETRICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Motores de indução trifásico .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Conjugado de um motor de indução.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Torque motor de indução .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Escorregamento do rotor .....</b>	<b>19</b>
<b>2.5 Frequência do rotor.....</b>	<b>20</b>
<b>3 TIPOS DE PARTIDAS .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Partida direta .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Partida por <i>Soft-Starter</i> .....</b>	<b>24</b>
<b>4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Controle escalar .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Controle Vetorial .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Análise comparativa .....</b>	<b>29</b>
<b>5 COMPRESSORES DE AR COMPRIMIDO.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Compressor alternativos a pistão.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Principio de funcionamento compressor alternativo a pistão .....</b>	<b>34</b>
<b>5.3 Compressores rotativos a parafuso.....</b>	<b>35</b>
<b>6 METODOLOGIA E TESTES .....</b>	<b>38</b>
<b>6.1 Etapa 1.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2 Etapa 2.....</b>	<b>43</b>
<b>7 RESULTADOS E DISCUÇÃO .....</b>	<b>47</b>

<b>7.1 Partida direta .....</b>	<b>47</b>
<b>7.2 Partida em rampa com inversor de frequência .....</b>	<b>49</b>
<b>7.3 Viabilidade de Custo .....</b>	<b>51</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>8.1 Ponto de continuidade .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias modernas trazem a utilização do ar comprimido, transformando o compressor em uma máquina imprescindível na sua planta. Nos anos atuais são muito utilizados em processos fabris, como acionamento de ferramentas pneumáticas, controle de equipamentos, transporte de materiais, etc.

A energia ar comprimido é a segunda mais consumida na indústria, atrás apenas da energia elétrica, sua fonte de obtenção é a mais acessível (ELETROBRÁS, 2009).

O gasto com energia elétrica em sistema com compressão de ar comprimido é significativo, a maioria das indústrias necessitam mais de energia elétrica do deveriam, pois operam com baixa eficiência, proporcionar maior eficiência em sistemas de ar comprimido é um desafio para as indústrias de transformação.

O tema escolhido para execução desse estudo foi a aplicação do inversor de frequência em um compressor de ar comprimido a pistão, para aperfeiçoar a eficiência energética do sistema, onde trará benefícios para o motor elétrico.

A metodologia que foi utilizada foi baseada nas visitas alternadas em empresas, artigos, sites e livros sendo possível conhecer a forma pela qual as indústrias utilizam o compressor e o inversor de frequência e aplicar então os conhecimentos adquiridos no curso, portanto a seguir serão apresentados os estudos: Corrente de partida, tipo de partida, Inversor de frequência, compressor de ar comprimido, entre outros.

O objetivo do projeto foi estudar a eficiência do conjunto compressor de ar comprimido alternativo a pistão, identificando seus benefícios para o sistema.

Os testes foram realizados em uma planta industrial composta por um compressor de ar comprimido alternativo a pistão e um inversor de frequência, os parâmetros foram ajustados no inversor e as medições da rede elétrica de alimentação do compressor.

Os dados coletados serão utilizados para analisar as seguintes melhorias:

- a) Consumo elétrico durante a partida e regime permanente de trabalho;
- b) Comparar sua eficiência energética com o sistema atual, considerando o retorno financeiro feito pelo *payback*;

## 2 MOTORES ELETRICOS

Motores elétricos são equipamentos tem objetivo de transformar a energia elétrica em energia mecânica. Motores assíncrono ou de indução possuem vantagens como baixo custo, comando simples, facilidade na limpeza, tornando mais usado de todos os tipos de motores (WEG, 2016).

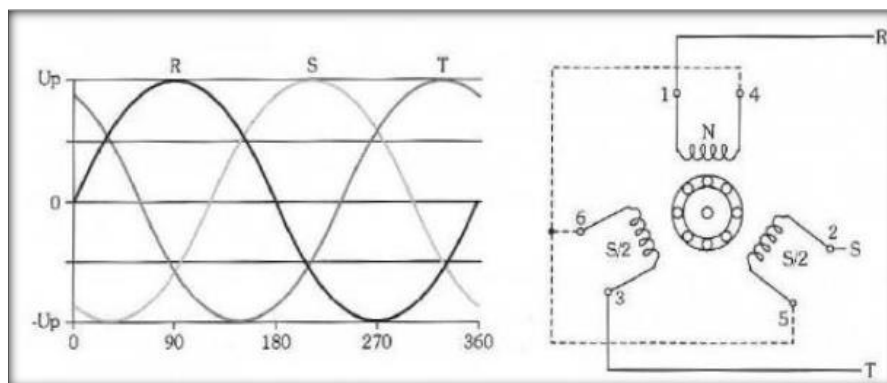
### 2.1 Motores de indução trifásico

Foram desenvolvidos nos anos 1882 a 1887 por Nikola Tesla, no decorrer dos anos os motores tiveram vários aperfeiçoamentos, exemplo disso foi a relação peso-potência, que era de 88 kg/kW em 1891 e que caiu para 5,7 kg/kW nos anos atuais. Decorrente do avanço tecnológico em técnicas de isolamento e na redução na secção dos condutores, sem haver perda na potência (SANTOS, et al. 2006).

O MIT (Motor de Indução Trifásico) trabalha com o princípio da indução eletromagnética, baseado no campo magnético girante, gerado por três bobinas defasadas geometricamente de  $120^\circ$ , são alimentadas por tensões trifásicas também defasadas em  $120^\circ$  elétrico no tempo (KOSOW,2005).

Defasamento elétrico e mecânico de um motor de indução trifásico é visto na Figura 1.

Figura 1 - Defasamento motor indução trifásico.



Fonte: CHAPMAN, 2013.

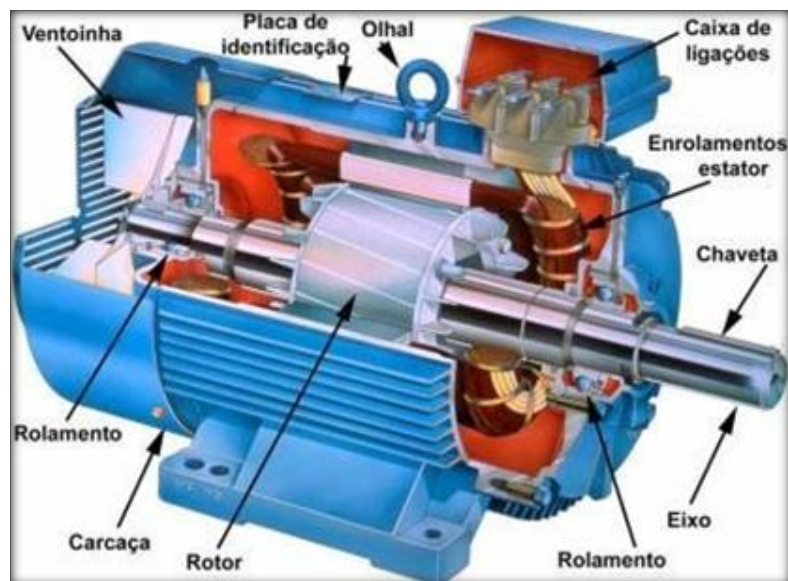
O motor de indução trifásico é composto por um único conjunto de enrolamento contínuo, devido a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) ser induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão

física de fios. Não exige uma corrente de campo CC para que a máquina funcione, esta característica o diferencia dos demais (CHAPMAN,2013).

Podemos dividir o MIT em duas partes fundamentais estator e rotor, no estator encontramos os enrolamentos de armadura que são alimentados por corrente CA também conhecido como a parte fixa, já o rotor pode ser do tipo gaiola de esquilo ou do tipo bobinado, é conhecido como a parte móvel. (GONÇALVES, 2012).

A Figura 2 ilustra as partes constituintes de um MIT.

Figura 2 - Construção de um MIT.



Fonte: SANTOS, 2011, p.4.

Motores industriais, podem ser construídos em vários formatos e potências, devemos destacar que as concessionárias colocam imposições quanto a partida de forma direta dos motores, são aceitos apenas abaixo de 5 cv e abaixo de 10 cv em instalações industriais, devem ser colocados em marcha por meio de partidas compensadas ou inversores de frequência.

Depois de conhecermos o funcionamento de um MIT, iremos estudar alguns outros aspectos de funcionamento.

## 2.2 Conjugado de um motor de indução

Conjugado por ser denominado “força de fazer girar” um objeto, sem ser exigente. (CHAPMAN, 2013).

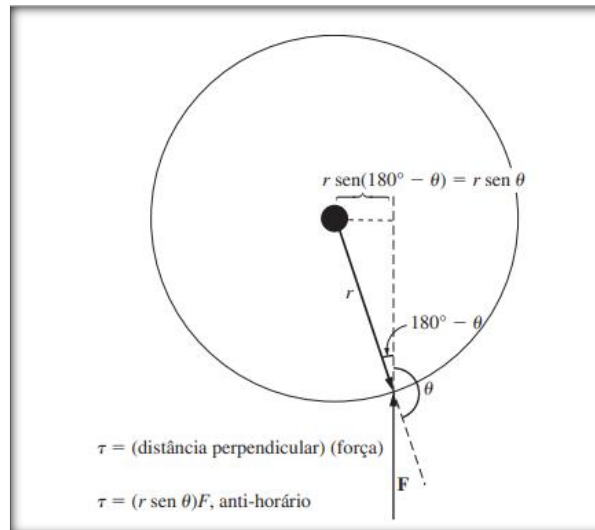


O conjugado é definido como o produto da força aplicada ao objeto vezes a menor distância entre a reta de ação da força e o eixo de rotação do objeto, podemos descrever pela Equação 1.

$$\begin{aligned}\tau &= (\text{força aplicada}) \times (\text{distancia perpendicular}) \\ \tau &= (F) \times (r \times \text{sen } \theta) \\ \tau &= r \times F \times \text{sen } \theta\end{aligned}\quad (1)$$

A Figura 3 nos orienta na dedução da Equação 1.

Figura 3 - Dedução da equação do conjugado em um objeto.



Fonte:CHAPMAN,2013, p. 6.

Onde,  $\theta$  é o ângulo entre o vetor  $r$  e o vetor  $F$ . O conjugado terá o sentido horário se ele tender a fazer com que a rotação seja horária e será anti-horário se ele tender a fazer com que a rotação seja anti-horária.

No motor de indução aplicamos um conjunto de tensão trifásica ao estator, resultando em um conjunto de corrente trifásica circulando o estator. As correntes produzem um campo magnético, que está girando no sentido anti-horário. (CHAPMAN, 2013). A velocidade síncrona de rotação do campo magnético é obtida pela Equação 2.

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 \times f}{p} \quad (2)$$

Onde,

$n_{sinc}$  = Velocidade síncrona (rpm)

$f$  = frequência do sistema no estator (Hz)

$P$  = número de polos da máquina

O campo magnético girante atravessa as barras do rotor e induz uma tensão nelas, a tensão induzida em uma barra do rotor é determinada pela Equação 3.

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (3)$$

Onde,

$e_{ind}$  = tensão induzida (V)

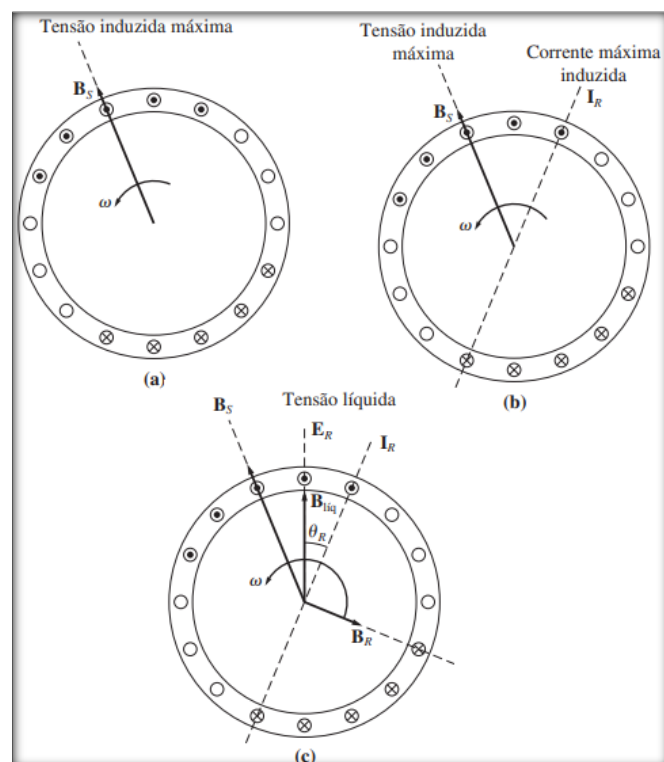
$v$  = velocidade da barra em relação ao campo magnético

$B$  = vetor densidade de fluxo magnético

$l$  = comprimento do condutor dentro do campo magnético

A Figura 4 ilustra a produção do conjugado anti-horário na máquina.

Figura 4 - Produção de conjugado induzido em um motor de indução.



Fonte: CHAPMAN,2013, p. 312.

Onde,

- a. O campo girante de estator  $\mathbf{B}_s$  induz uma tensão nas barras do rotor;
- b. A tensão no rotor produz um fluxo de corrente no rotor, que está atrasado em relação à tensão devido à indutância do rotor;
- c. A corrente do rotor produz um campo magnético girante  $\mathbf{B}_R$  que está atrasando  $90^\circ$  em relação a ela própria.

O rotor faz um movimento relativo que em relação ao campo magnético do estator gera a tensão induzida na barra do rotor. As barras superiores do rotor tem uma velocidade para a direita em relação ao campo magnético, assim sendo, a tensão induzida nas barras superiores é para fora da página, à medida que a tensão induzida nas barras inferiores é para dentro da página. De acordo com Chapman(2013) isso resulta em um fluxo de corrente para fora das barras superiores e para dentro das barras inferiores. Entretanto, como a estrutura do rotor é induzida, a corrente de pico do rotor está atrasada em relação a tensão de pico do rotor. O fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético de rotor  $B_R$ .

Em conclusão, como o conjugado induzido do rotor é anti-horário, com isso o rotor acelera nesse sentido. Porém existe um limite para a velocidade do motor. Segundo Chapman (2013) se o rotor do motor de indução estiver girando na velocidade síncrona, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético e não teria tensão induzida. Logo, se  $e_{ind}$  for zero, não teremos corrente nem campo no rotor. Sendo assim o conjugado induzido será 0 e o rotor decai sua velocidade com o atrito. Portanto, um motor ganha velocidade até próximo da sua velocidade síncrona, em nenhum momento a alcançá-la exatamente.

### 2.3 Torque motor de indução

O conjugado resultante da interação do campo magnético do circuito do rotor e o campo magnético do circuito do estator presente nas máquinas CA produz torque (CHAPMAN,2013).

É a medida do esforço necessário para girar o eixo pode se calculado pela Equação 4.

$$t = \frac{P}{n_r} \quad (4)$$

Onde,

t = torque (N.m.)

p = potência desenvolvida (W)

$n$  = velocidade nominal do rotor (rad/s)

## 2.4 Escorregamento do rotor

A tensão induzida nas barras do rotor de um MI (motor de indução) resulta da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como a reação de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, constantemente é mais lógico falar em velocidade relativa. Habitualmente utilizamos dois termos para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. A velocidade de escorregamento é a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor (CHAPMAN,2013). Obtida através da Equação 5.

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (5)$$

Em que,

$n_{esc}$  = velocidade de escorregamento da maquina

$n_{sinc}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_m$  = velocidade mecânica do eixo do motor

Utilizamos também outro método para descrever o movimento relativo, o escorregamento que é a velocidade relativa expressa por uma base por unidade ou porcentagem (CHAPMAN, 2013). Definimos o escorregamento como sendo a Equação 6 apresentado a seguir:

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% \quad (6)$$

Onde,

$S$  = escorregamento

$n_{sinc}$  = velocidade dos campos magnéticos

$n_m$  = velocidade mecânica do eixo do motor

Verifica-se que, se o rotor estiver girando na velocidade síncrona,  $S = 0$ , ao mesmo tempo que, se o rotor estiver estacionário,  $S = 1$ . Todas as velocidades normais de um motor recaem em algum lugar entre esses dois limites.

Podemos expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento como apresentado na Equação 7.

$$n_m = (1 - S) \times n_{sinc} \quad (7)$$

Temos,

$n_m$  = velocidade mecânica do eixo do motor

$n_{sinc}$  = velocidade dos campos magnéticos

S = escorregamento

## 2.5 Frequência do rotor

O motor de indução trabalha induzindo tensões e corrente no rotor da máquina e por esse motivo foi denominado transformador rotativo algumas vezes. Como tal, o primário (estator) induz uma tensão no secundário (rotor). Porém diferente de um transformador, a frequência do secundário não é necessariamente a mesma da frequência do primário (CHAPMAN, 2013).

Se o rotor de um motor for bloqueado ou travado de modo que ele não possa se mover, o rotor terá a mesma frequência do estator. De outro modo, se o rotor girar na velocidade de sincronismo, a frequência do rotor será zero.

Logo se  $n_{sinc} = 0$ , a frequência do rotor é  $f_{re} = f_{se}$  e o escorregamento é  $S = 1$ .

Para  $n_m = n_{sinc}$ , a frequência do rotor será 0 Hz e o escorregamento é  $S = 0$ . Em qual quer instante que a velocidade intermediária, a frequência do rotor é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético  $n_{sinc}$  e a velocidade do rotor  $n_m$ . Já que o escorregamento do rotor é definido pela Equação 5, a frequência podemos calcular pela Equação 8.

$$f_{re} = S \times f_{se} \quad (8)$$

Onde,

$f_{re}$  = frequência do rotor (Hz)

S = escorregamento percentual

$f_{se}$  = frequência do estator (ou da tensão de alimentação) (Hz)

Para que tudo isso que vimos funcione de forma correta temos que nos atentar para qual método de partida iremos utilizar, já que a corrente solicitada é muito maior do que o serviço contínuo.

### 3 TIPOS DE PARTIDAS

Os tipos de partidas mais comuns utilizados em motores de indução, estão neste estudo. Iremos analisar estes três tipos: direta, *soft-starter* e controlada por inversor de frequência.

#### 3.1 Partida direta

O método mais comum de partida de motor, tem como perfil uma corrente elevada, atingindo de 6 a 10 vezes o valor da corrente nominal (CAPELLI, 2007).

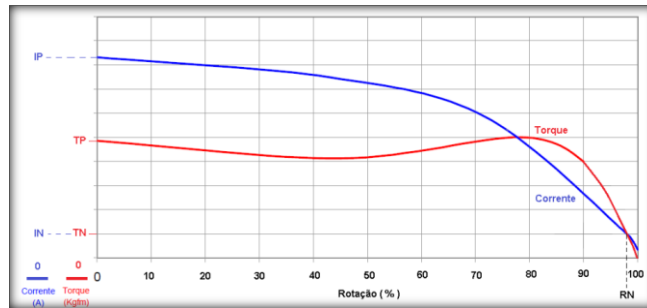
O período de partida dos motores elétricos é um dos mais críticos, motores requerem muito mais corrente durante a partida, do que em regime permanente, também conhecido como pico de corrente de partida. Obtém-se a corrente de partido ou de rotor bloqueado na placa  $IP/IN$ , dependendo deste valor e do período que a carga estiver no motor, o tempo dessa corrente pode ser suficiente para fazer os dispositivos de proteção atuarem no circuito de comando (NASCIMENTO, 2015).

Consequências da partida com corrente elevada:

- a) Grande redução na tensão da rede elétrica de alimentação, o que causa interferência em outros dispositivos instalados;
- b) Concessionárias impõem limitações de queda de tensão e a demanda;
- c) Contadores e disjuntores superdimensionados, elevando o custo da instalação.

O comportamento da corrente de partida e do torque para partida direta podemos visualizar na Figura 5

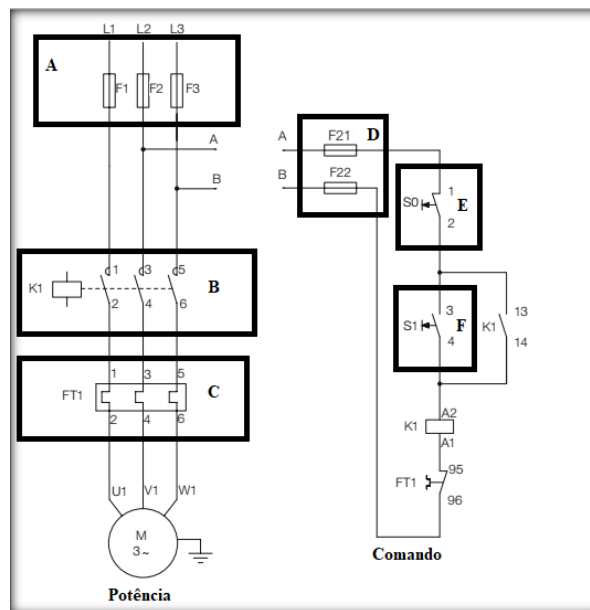
Figura 5 - Curva característica Torque/corrente em função da velocidade.



Fonte: NASCIMENTO, 2015 P.3.

A partida direta é feita simplesmente conectando o motor a rede elétrica que irá alimentá-lo, geralmente utiliza-se um contator, como mostra o esquema de ligação da Figura 6.

Figura 6 - Partida direta motor indução trifásico.



Fonte: WEG, 2013

#### Legenda:

- A. Fusíveis de potência é dispositivo de proteção de sobrecorrente (curto-circuito);
- B. Contator é um dispositivo eletromecânico que permite, a partir de um circuito de comando, efetuar o controle de cargas num circuito de potência;
- C. Relé de sobrecarga térmico é um dispositivo que atua na proteção do circuito contra sobrecarga, bloqueando a passagem de corrente quando ela passa de um determinado valor. Assim, motores elétricos e outros circuitos de potência podem ser protegidos em casos de anomalias na rede elétrica;
- D. Fusíveis de comando é dispositivo de proteção de sobrecorrente (curto-circuito);
- E. Botão de comando têm como função estabelecer ou interromper a passagem de corrente elétrica em linhas de um circuito de comando, a partir de um acionamento manual, local ou à distância;
- F. Botão de comando.



Vantagens de utilizar partida direta e o baixo custo, simples implementação e um alto torque na partida.

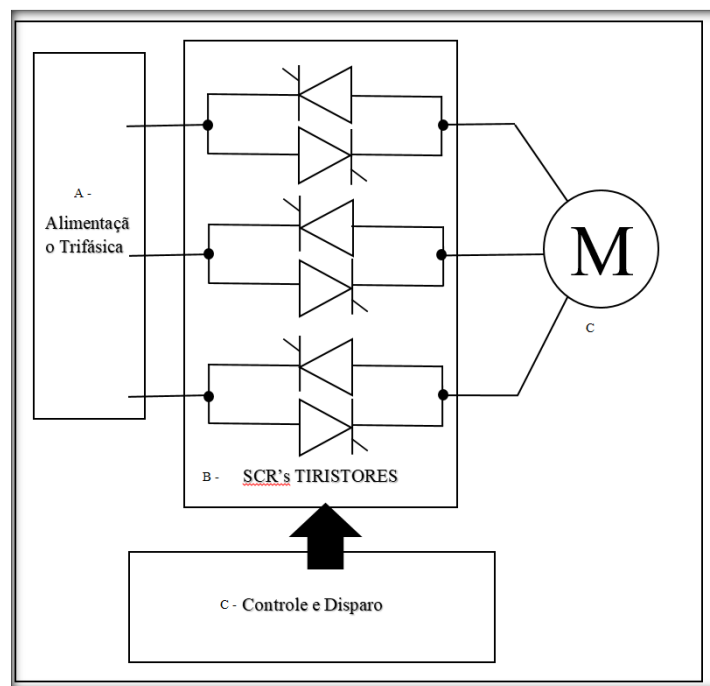
Desvantagens são alta corrente de partida, provocando uma queda de tensão na rede de alimentação, picos de torque entre outras.

### 3.2 Partida por *Soft-Starter*

Os soft-starter são dispositivos eletrônicos desenvolvidos para partidas suaves, composto por tiristores SCR's, ativados por circuitos eletrônicos. Dispostos de tal forma a controlar tensão aplicado no motor durante a partida e desligamento.

A Figura 7 traz o diagrama em blocos do soft-starter.

Figura 7 - Diagrama em bloco da Soft-Starter.



Fonte: O autor.

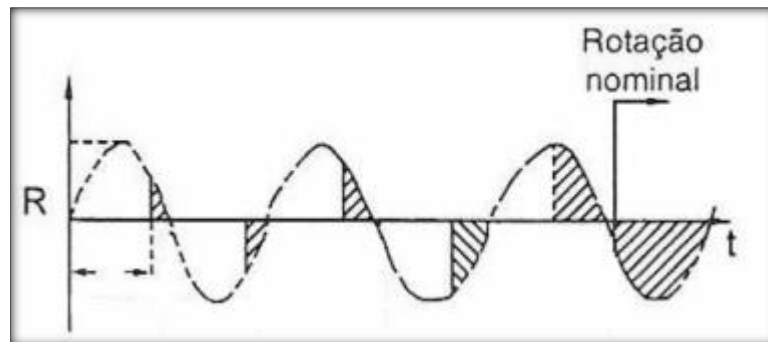
#### Legenda:

- A. Circuito de alimentação da soft-starter
- B. Os SCR's tiristores permite que a tensão aplicada ao motor varie de forma linear, permitindo assim um controle sobre a corrente de partida, quando alcançamos o valor da tensão nominal, os terminais são conectados diretamente à rede elétrica, ou seja, é como se os tiristores conduzissem permanentemente (SCHNEIDER ELETRIC, 2003).
- C. O circuito de controle e disparo é constituído por conjuntos de componentes que monitoram, comandam e protegem o circuito de potência, assim como os circuitos de sinalização e interface com o usuário.

A frequência ou a velocidade não é alterada pela chave de partida estática soft-starter, durante a partida os tiristores comutam a alimentação do motor, fazendo com que a tensão aplicada diminua e limitando a corrente que circula no motor, de forma que o motor vai ganhando velocidade, a corrente consumida vai abaixando e a soft-starter começa a aumentar a tensão até seu valor nominal (SALIN, 2011).

A forma de onda da partida de uma *soft-starter* pode ser vista a seguir na Figura 8.

Figura 8 - Forma de onda da *Soft-starter*.



Fonte: Comandos elétricos, IFTC-SC,2009, pág. 17.

O soft-starter garante uma aceleração e desaceleração suave do motor, assim podemos utilizar a soft-starter para substituir os métodos clássicos de partida por chave compensadora, direta e estrela-triângulo. Limitada em motores de alto conjugado de partida, o inversor de frequência a seguir não só controla a partida do motor, como também controla a sua velocidade.

## 4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Inversor de frequência é um equipamento que controla a velocidade de motores de corrente alternadas, por meio da alteração da frequência e do módulo da tensão da rede elétrica que alimenta o motor trifásico, também é utilizado para partida de motores (FRANCHI,2009).

A Figura 9 a seguir nos apresenta um inversor de frequência instalado em um compressor a parafuso.

Figura 9 - Inversor de frequência.

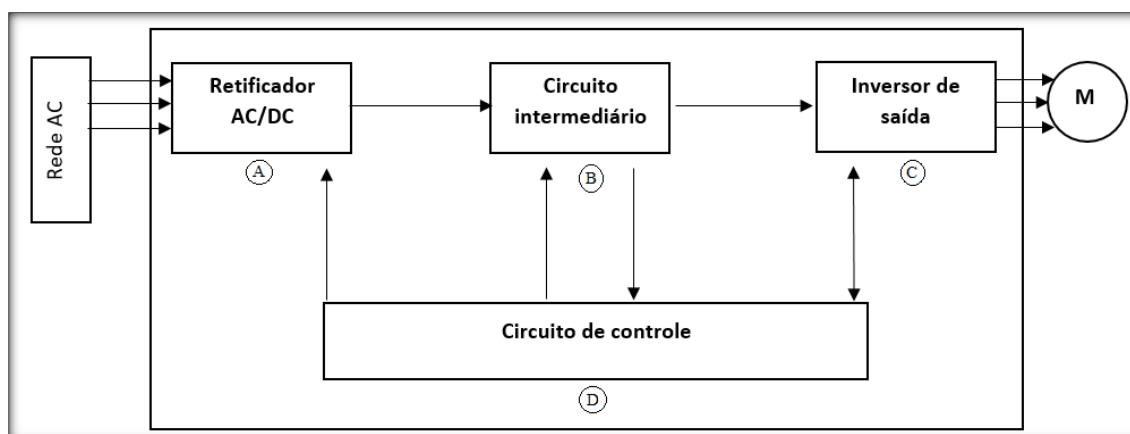


Fonte: O autor.

A velocidade de um motor corrente alternada (CA) depende da frequência que o alimenta, quanto menor for a frequência menor será a rotação sendo recíproca verdadeira (AMÉRICO, 2004).

Um inversor de frequência possui basicamente 3 blocos, detalhes das partes principais na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama em blocos.



Fonte: O autor.

#### Legenda:

- A. O retificador trifásico é composto por diodos que são componentes semicondutores que permitem o fluxo de corrente em apenas um único sentido, do anodo para o catodo. Quando aplicada uma tensão CA sobre um diodo é convertida em tensão corrente contínua (CC) pulsante. (OLIVEIRA, 2013);
- B. O circuito intermediário pode ser dividido em um filtro para as oscilações de *ripple* da tensão DC gerada pelo retificador e como um *chopper* que é um regulador que controla a amplitude da tensão DC disponibilizada ao inversor de saída. (OLIVEIRA, 2013);
- C. Inversor de saída é o bloco que tem a função de transformar a tensão DC em tensão AC na saída simétrica com a magnitude e a frequência pretendida. (OLIVEIRA, 2013);
- D. O circuito de controle é responsável por controlar todos os blocos funcionais, realizar o sequenciamento correto do chaveamento das chaves controláveis do inversor de saída e regular o ponto da tensão de saída no circuito intermediário. (OLIVEIRA, 2013).

Existem basicamente quatro tipos de controle utilizados em grande escala: o escalar (Volts/Hertz), controle vetorial sensorless, controle de fluxo vetorial e controle de campo orientado. Todos utilizam o PWM (Pulse With Modulation) como dispositivo de partida, baseado em algoritmos de controle (FERREIRA COSTA, 2014).

#### 4.1 Controle escalar

O controle escalar funciona com a elevação da frequência do sinal exigido à armadura do motor e a correção do valor da tensão, a corrente de magnetização da máquina cai proporcionalmente e com ela, o fluxo estabelecido entre o entreferro. A seguir com a redução do fluxo magnético, reduz-se o conjugado disponibilizado por essa corrente – operação com enfraquecimento de campo (FERREIRA COSTA, 2014).

Uma das soluções são:

- a) Motor com maior fator de serviço;
- b) Classe de isolamento das bobinas para maior temperatura;
- c) Motor com mais aletas para troca de calor;
- d) Motor com ventilação forçada.

Motores com ventilação independente ao eixo de rotação, dentro de um intervalo que vai de 10 Hz até a frequência nominal, pode-se obter um conjugado de 90% do nominal (Fischer, 2006).

Devemos dobrar a atenção na aplicação de inversores para acionamento de motores de baixa rotação, pois nesse contexto, tipicamente inferior aos 50% da rotação nominal, o fluxo de ar que circula pelas aletas do motor é deficiente, a troca de calor é prejudicada e a potência fornecida pelo motor deve ser reduzida para não sofrer nem uma queima dos materiais isolantes de seu enrolamento de armadura (FERREIRA COSTA, 2014).

Segundo FERREIRA COSTA (2014) o controle escalar é aplicado porque a grande parte das aplicações não necessitam de alta precisão/ou rapidez no controle de velocidade e por ser uma aplicação simples.

## **4.2 Controle Vetorial**

Máquinas de corrente contínua com sistemas de controle em malha fechada já atendiam essas necessidades. Utilizadas continuamente devido à proporcionalidade da corrente de armadura, do fluxo e do torque que permitiam um meio direto para seu controle. Com o andar das tecnologias, aplicar motores de corrente contínua vem perdendo espaço radicalmente (FERREIRA COSTA, 2014).

Utilizada em operações que requerem alta performance dinâmica, alta precisão no ajuste de velocidade e respostas rápidas. Segundo FERREIRA COSTA (2014) é aconselhável que o motor disponha de um controle preciso de torque para uma faixa extensa de condições de operação.

Temos dois tipos de operações de controle vetorial: em malha aberta ou em malha fechada.

### 4.3 Análise comparativa

O escalar considera as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas (fluxos, correntes e tensões) referido ao estator, equacionamento baseado no circuito equivalente do motor, isto é, são equações de regime permanente (FERREIRA COSTA, 2014).

Segundo FERREIRA COSTA (2014) o sistema vetorial admite a representação das grandezas elétricas instantâneas por vetores, pautado em equações dinâmicas da máquina com grandeza referida ao fluxo enlaçado pelo rotor, isto é, o motor de indução é assistido pelo controle vetorial como um motor de corrente contínua, havendo regulação independente para torque e o fluxo.

O Quadro 1 nos apresenta o comparativo entre os tipos de controle

Quadro 1 - Comparativo entre tipos de controle de inversor de frequência e conversores CA/CC.

	<b>Controle escalar</b>	<b>Controle vetorial</b>		<b>Conversor CC com tacômetro</b>
		Malha fechada	Malha aberta	
<b>Realimentação</b>	Não há			Não há
<b>Torque em velocidade zero</b>	Impossível	Possível	Impossível	Possível
<b>Regulação de velocidade</b>	Depende do escorregamento	0,01%	0,20%	0,20%
<b>Controle de torque</b>	Muito baixo	Alto	Somente no limite	Alto

Fonte: Adaptado de Franchi (2009).

Os inversores de frequência ajustam eletronicamente compressores de ar comprimido a controlar a velocidade do motor e consumindo apenas a energia necessária da rede para produzir o ar.

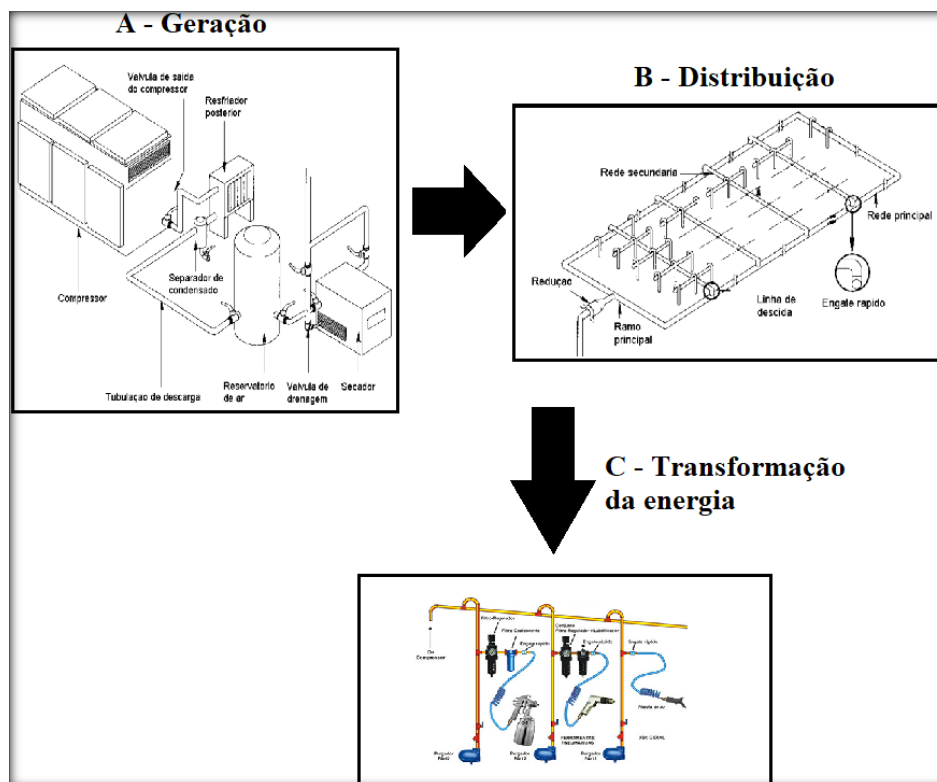
## 5 COMPRESSORES DE AR COMPRIMIDO

Compressores são máquinas com o objetivo de aumentar a pressão de um gás fazendo percorrer qualquer dois pontos (SARKIS, 2002).

O primeiro compressor de ar comprimido foi registrado no século XVIII na Inglaterra, o mesmo foi desenvolvido para fornecer assombrosa pressão de 1 bar, suas válvulas e vedações foram concebidas em madeira e couro, não permitindo maiores pressões. A evolução dos compressores ocorreu após os anos 1900 tendo um aumento na sua pressão fornecida de 350 bar e uma capacidade de armazenamento de até 1.500m<sup>3</sup> (HAHN, 2004).

O sistema de ar comprimido pode ser dividido em três grupos que são eles geração, distribuição e consumo (transformação da energia contida no ar comprimido em trabalho) como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Blocos de um sistema de ar comprimido.



Fonte: O autor.

- a) Geração e a entrada do sistema captação, compressão, tratamento e armazenamento do ar comprimido;

- b) Distribuição e toda a linha de transmissão da energia do reservatório de armazenamento até local de consumo;
- c) Consumo é transformação da energia contida no ar comprimido em trabalho.

Existem dois tipos de compressores principais, os alternativos e os rotativos na Figura 12 temos um compressor alternativo.

Figura 12 - Compressor alternativo a pistão.



Fonte: AtlasCopco, 2021.

A linha de distribuição requer uma atenção maior, pois pequenos orifícios podem gerar grandes desperdícios de energia no acumulado. Segundo Rocha e Monteiro (2005) vazamentos de até 10% em grandes plantas são admissíveis, o nível de aceitabilidade como regra geral deve ser de 5%, como os vazamentos normalmente são omitidos, assumindo grande importância no consumo de energia elétrica e conseqüentemente no custo final do ar comprimido.

A Tabela 1 a seguir apresenta perdas de ar comprimido devido ao vazamento, em relação ao diâmetro e da pressão.

Tabela 1 – Perdas de ar comprimido devido a vazamentos, em função do diâmetro e a pressão.

Pressão (bar)	Diâmetro do orifício							
	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm	2,5 mm	3,0 mm	3,5 mm	4,0 mm
	Vazamento (m <sup>3</sup> /h)							
4,5	0,748	2,992	6,731	11,96	18,69	26,92	36,64	47,86
5,0	0816	3,263	7,343	13,05	20,39	29,37	39,97	52,216
5,5	0,884	3,535	7,955	14,14	22,09	31,81	43,30	56,56



6,0	0,952	3,807	8,567	15,23	23,79	34,26	46,64	60,91
6,5	1,020	4,079	9,179	16,31	25,46	36,71	49,97	65,26
7,0	1,088	4,351	9,790	17,40	27,19	39,16	53,30	69,62
7,5	1,156	4,623	10,40	18,49	28,89	41,60	56,63	73,97
8,0	1,224	4,895	11,01	19,58	30,59	44,05	59,96	78,39
8,5	1,292	5,167	11,62	20,66	32,29	46,50	63,29	82,67
9,0	1,360	5,439	12,23	21,75	33,99	48,95	66,62	87,02
9,5	1,428	5,711	12,85	22,84	35,69	51,40	69,96	91,37
10,0	1,496	5,983	13,46	23,93	37,39	53,84	73,29	95,72
10,5	1,564	6,255	14,07	25,02	39,09	56,29	76,62	100,08
11,0	1,632	6,527	14,68	26,10	40,79	58,74	79,95	104,73
11,5	1,700	6,799	15,29	27,19	42,49	61,19	83,28	108,78
12,0	1,768	7,071	15,90	28,28	44,19	63,63	86,61	113,13

Fonte: Adaptado de Hahn (2004).

Para analisarmos o comportamento de vazamento e o desperdício de energia anual, Perrone et al (2001) elaboraram uma tabela sob pressão de 7 bar utilizando um compressor tipo parafuso que consuma em média 6,3 kW min / Nm<sup>3</sup> para comprimir o ar, a Tabela 2 traz este estudo.

Tabela 2 - Consumo de energia em vazamentos.

<b>Diâmetro do orifício (mm)</b>	<b>Vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Consumo anual de energia (R\$)</b>
0,4	0,402	348,15
0,8	1,7268	1.479,56
1,60	6,8058	5.831,29
3,20	27,4266	23.499,34
6,40	109,6062	93.910,35
9,60	246,33	211.058,91
12,7	430,70	369.023,74

Fonte: Adaptado de Perrone et al (2001).

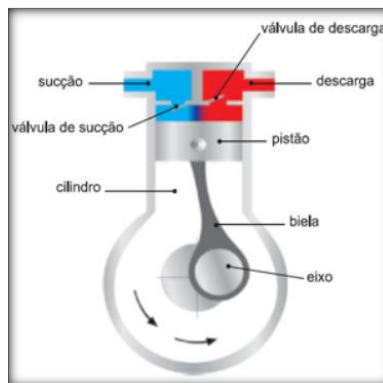
Um vazamento requer ar continuamente, oposto a uma ferramenta pneumática que em média trabalha somente 40 a 50 % do tempo (ATLAS COPCO,1976).

Iremos contextualizar o funcionamento básico de um compressor alternativo a pistão e um compressor rotativo a parafuso a seguir.

### 5.1 Compressor alternativos a pistão

Nos alternativos a compressão dos gás é feita em uma câmara de volume variável por um pistão que está ligado a uma biela-manivela, quando o pistão está em progressão ele comprime o gás a um valor determinado, válvula de descarga se abre deixando o gás sair, praticamente com pressão contínua. Ao final do movimento de progressão, a válvula de exaustão se fecha e a de admissão se abre, ocupando a câmara à medida que o pistão se mexe (AMORIM PRISCILA, 2010). A Figura 13 traz um pistão em corte.

Figura 13 - Pistão em corte.



Fonte: Passetti Giovani,2016.

Compressores de pistão vão de um único cilindro de baixa pressão/baixo volume a uma disposição de fases múltiplas com capacidade de comprimir a uma pressão muito alta, temos na Figura 14 um compressor alternativo a pistão.

Figura 14 - Compressor alternativo a pistão.



Fonte: SCHULZ,2021.

Os compressores de um estágio normalmente trabalham com pressões de 1,7 a 7 bar, com dois estágios comprimem, na maioria das vezes, de 7 a 16,5 bar (ROOLLINS,2004).

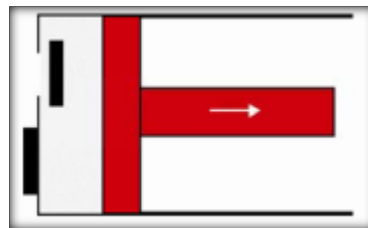
## 5.2 Princípio de funcionamento compressor alternativo a pistão

Os compressores a pistão aspiram e comprimem o ar ao longo de seu movimento entre o ponto morto inferior e o ponto morto superior, ao passo que acionamos as válvulas admissão e descarga de ar (AMORIM PRISCILA, 2010).

Para que possamos realizar a compressão ao longo do movimento linear do pistão, o cabeçote é equipado com válvulas na admissão e descarga do ar. Durante a admissão do ar o êmbolo volta à sua posição inferior no cilindro, abaixando a pressão no interior do mesmo (AMORIM PRISCILA, 2010).

A Figura 15 mostra a válvula de sucção abrindo possibilitando a entrada de ar a ser comprimido.

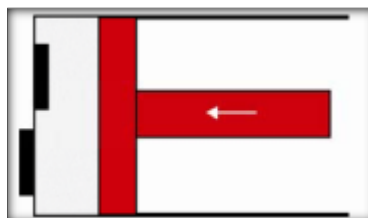
Figura 15 - Admissão de ar.



Fonte: Amorim Priscila, 2010.

No período da compressão, a válvula de sucção permanece fechada como a Figura 16 nos mostra.

Figura 16 - Compressão.



Fonte: Amorim Priscila, 2010.

Enquanto a pressão no interior do cilindro torna-se maior que a pressão na descarga, a válvula de descarga abre, permitindo a saída do ar comprimido, a Figura 17 ilustra esse movimento.

Figura 17 - Descarga.



Fonte: Amorim Priscila, 2010.

Ao fim do trajeto ascendente do êmbolo, a válvula de descarga fecha e o êmbolo inicia um novo ciclo a Figura 18 nos traz essa ilustração.

Figura 18 - Expansão.



Fonte: Amorim Priscila, 2010.

Vimos que o êmbolo não consegue encostar no topo do cilindro, uma parte de ar ainda permanece no volume morto do cilindro, fazendo com que a válvula de sucção só abra quando a pressão no interior do cilindro diminua ao nível permitido (Amorim Priscila, 2010).

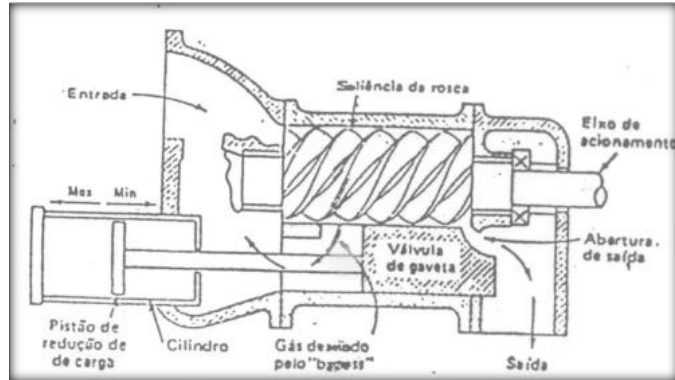
### 5.3 Compressores rotativos a parafuso

Os primeiros compressores a parafuso surgiram nos anos 1950, porém apenas em 1960 conseguiram apresentar eficiência energética próxima dos compressores alternativos a pistão (HAHN, 2004).

Esses compressores foram desenvolvidos com a necessidade de produzir altas vazões, na casa de 10000 m<sup>3</sup>/h e que se estabilizasse com a variação da carga (Andrew Parr, 2006).

A Figura 19 traz um parafuso em corte.

Figura 19 - Corte de um compressor rotativo a parafuso.



Fonte: Maria Lucila, 2012.

Compressores rotativos contém dois rotores montados dentro de uma carcaça com um excentricidade, no rotor são montadas palhetas móveis, fazendo com que as palhetas se movam para dentro e para fora de suas ranhuras. O gás preso no meio das palhetas sucessivas é comprimido, à medida que o volume entre elas diminui devido ao movimento de rotação e à excentricidade do rotor (Rocha, 2005). A Figura 20 traz um compressor a parafuso.

Figura 20 - Compressor rotativo a parafuso.



Fonte: SCHULZ, 2021.

O Quadro 2 a seguir mostra um comparativo entre os compressores a rotativo a parafuso e alternativo a pistão.

Quadro 2 - Comparativo compressor Parafuso e Pistão.

	Parafuso Rotativo	Alternativo a pistão
Espaço físico	Médio	Grande
Compressão	Ótima relação compressão e produção de ar	Consumo maior de energia para produção de ar
Rendimento	98%	70%
Consumo energético	Até 20% menos com alívio de carga	Mais energia comparado com o compressor a parafuso
Operações Máxima	24 Horas, sem interrupção	12 Horas
Manutenção	Baixo	Alta
Aplicações	Indústria alimentícia, farmacêutica, Alimentos e bebidas, fábricas setor automobilístico, petroquímico, militar	Oficinas automotivas, construção civil, indústrias
Ruído sonoro	Cabine acústica, gerando entre 12 e 15 % abaixo do recomendado	Nem um tratamento acústico
Preço	Maior preço, necessário analisar a aplicação	Menor Custo

Fonte: O autor.

Com o auxílio da Quadro 2 tiramos várias conclusões com qual tipo de compressor podemos trabalhar.

Em uma indústria de pequeno e médio porte onde encontramos vários compressores a pistão podemos concluir que esse compressor pode sofrer alguns ajustes para melhorar seu rendimento, conseqüentemente diminuindo seus ruídos sonoros.

Já o compressor a parafuso aplicado em indústrias de grande porte como alimentícias, só não toma o espaço do compressor a pistão por ter seu custo mais elevado.

## 6 METODOLOGIA E TESTES

O método proposto para desenvolvimento deste estudo foi dividido em duas etapas a fim de organizar, otimizar os recursos e tempo gasto.

Para analisar o funcionamento e fenômenos ocorridos referente a partida do compressor na rede elétrica, durante dois métodos de partidas mencionadas anteriormente em um MIT utilizamos um analisador de qualidade de energia.

Esse sistema foi implementado em uma empresa com uma planta de ar comprimido que trabalha 9 horas por dia, situada na cidade de Varginha, Minas Gerais.

A planta dessa empresa é composta por ferramentas pneumáticas, 4 delas são rebiteadeiras pneumáticas conforme a Figura 21.

Figura 21 - Rebiteadeira pneumática.



Fonte: O autor.

As rebiteadeiras devem trabalhar com uma pressão de trabalho de 6 BAR, tendo como consumo 5,1 Litro por ciclo.

A empresa possui também Router CNC Nina Gold Plus que utiliza o ar para resfriar os rolamentos e para substituição de ferramentas como da Figura 22.

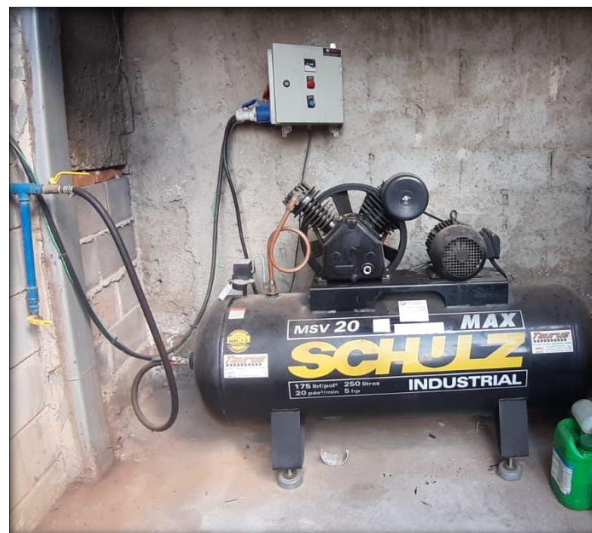
Figura 22 - Router CNC (Nina Gold Plus).



Fonte: Aviso (2019).

Essas ferramentas utilizam a energia ar comprimido fornecida por um compressor Schulz MSV 20 MAX instalado conforme a Figura 23.

Figura 23 - Compressor de ensaio.



Fonte: O autor.

O compressor alternativo a pistão de ensaio é um Schulz MSV 20 MAX instalado conforme a Figura 23, a máquina é equipada com um MIT de 5CV com 87,6% eficiência ligado em 220V trifásico da WEG.



Após essa breve verificação das ferramentas e suas características definimos os equipamentos listados abaixo para realizar os ensaios:

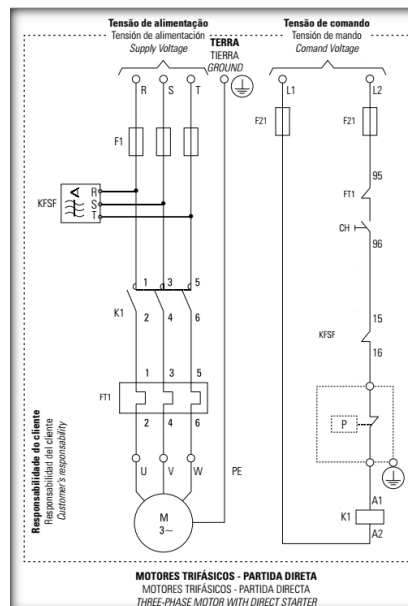
- a) Schulz MSV 20 MAX;
- b) Chave contatora;
- c) Inversor de frequência CFW09;
- d) Analisador de qualidade de energia Fluke 435.

## 6.1 Etapa 1

A primeira etapa foi analisar a planta, localizar o compressor e sua instalação, em seguida analisamos o diagrama elétrico da atual instalação para definirmos o local para instalação do medidor de energia para coletar os dados do sistema atual.

Nessa primeira etapa o diagrama elétrico do sistema não sofreu nem uma alteração como vimos na Figura 23 e utilizado a partida direta para esse acionamento.

Figura 24 - Diagrama elétrico painel de comando compressor.



Fonte: SCHULZ, 2019.

Os componentes do sistema são:

F1 – Fusível tipo D;

KFSF – Relé por falta de fase;

K1 – Contator tripolar;  
FT1 – Rele de sobrecarga;  
CH – Chave liga / desliga;  
P – Pressostato.

Ao mudar a posição da chave (CH), o circuito opera acionando uma contatora (K1) e ao chegar na pressão máxima ajustada o pressostato (P) detecta esta pressão e o sistema desliga, caso haja falta de fase o KFSF desliga o sistema.

A Figura 25 traz a atual instalação do sistema na planta da empresa.

Figura 25 - Quadro de partida.

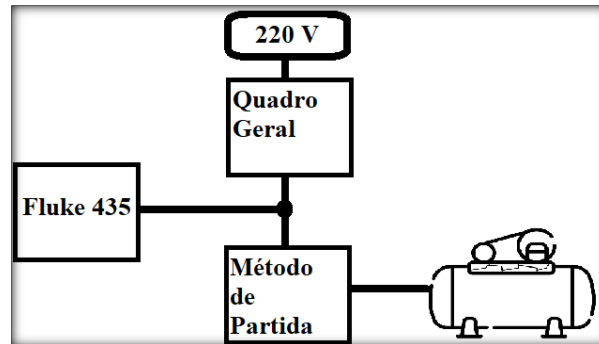


Fonte: O autor.

A diferença entre o sistema sugerido pelo fabricante e o sistema instalado é um horímetro analógico para auxiliar na troca de óleo.

Assim, definimos o local onde instala o medidor de energia para coletar os dados foi o quadro geral da empresa como diagrama da Figura 26.

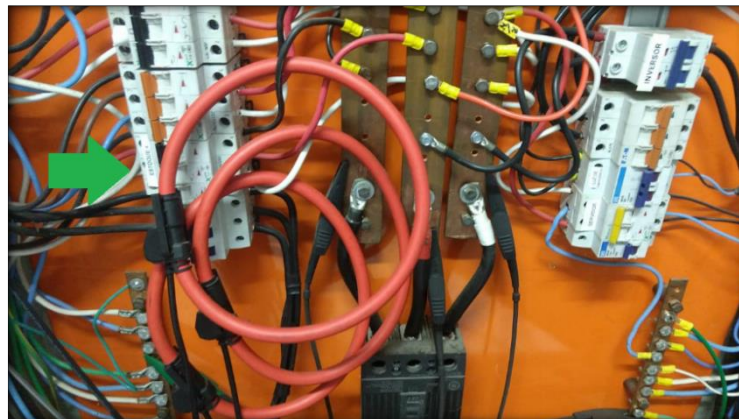
Figura 26 - Diagrama de instalação.



Fonte: O autor.

Para que os dados e a análise fossem realidade de forma coerente o analisador de qualidade de energia Fluke 435 e instalado entre o disjuntor de proteção do circuito do compressor e o método de partida a ser analisado a Figura 27 traz a real instalação do medidor.

Figura 27 - Quadro geral.



Fonte: O autor.

O medidor está conectado diretamente na entrada do disjuntor que alimenta o compressor como a seta anterior nos mostra.

O Fluke-435 é um analisador de qualidade de energia e foi utilizado para medir os dados da rede elétrica no circuito do compressor no quadro geral da empresa a Figura 28

Figura 28 - Fluke 435 medido qualidade de energia.



Fonte: O autor.

Usamos o *Fluke-435 power quality analyzer*, para coletar os dados da rede elétrica, trata-se de um analisador de rede com vários parâmetros analisados que é comumente usado para obtenção de resultados para análise de qualidade de energia elétrica gerando relatórios precisos.

## 6.2 Etapa 2

Nessa segunda etapa alteramos o meio de partida do compressor para um método com inversor de frequência, para controle de partida em rampa o inversor foi instalado conforme a Figura 29.

Figura 29 - Compressor e inversor de frequência.

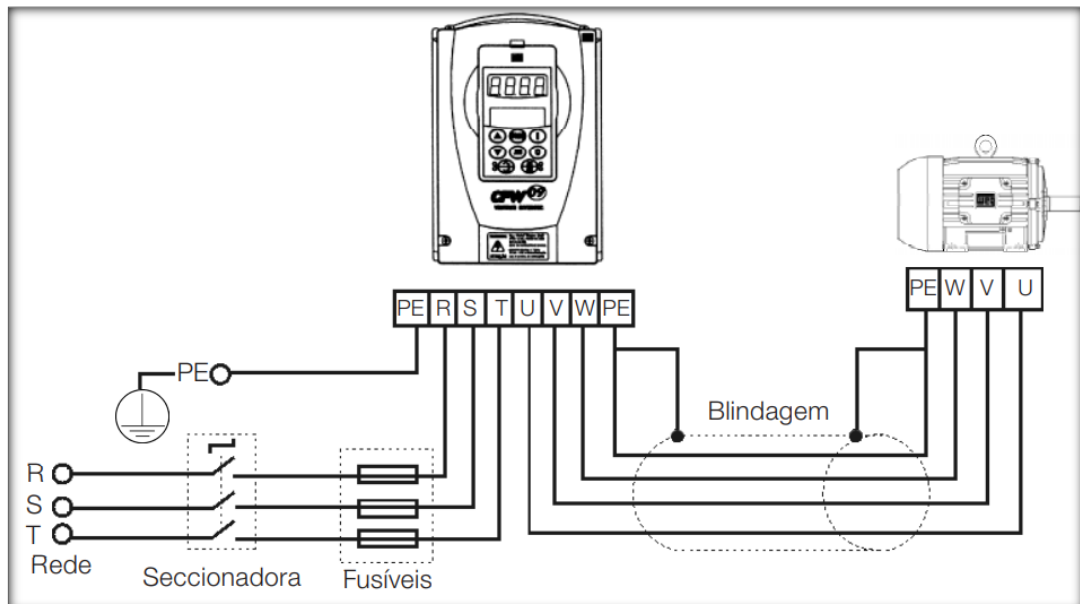


Fonte: O autor.

Vimos que o compressor está conectado diretamente ao inversor de frequência sem passar pelo acionamento de partida direta.

O diagrama de acionamento com o inversor de frequência é apresentado na figura 30

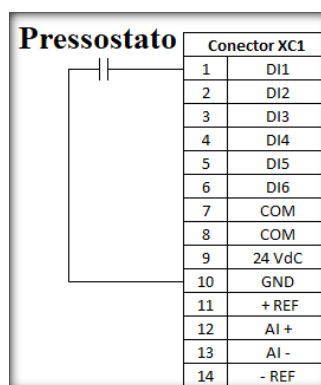
Figura 30 - Inversor conectado ao motor.



Fonte: WEG (2018).

O acionamento do inversor de frequência é feito pelo pressostato do compressor conectado à porta digital 01 do inversor de frequência como a Figura 31 nos apresenta.

Figura 31 - Acionamento inversor.



Fonte: O autor.

Assim o pressostato faz o controle de acionamento do inversor de frequência que ao atingir a pressão ajustada desliga o motor elétrico e ao atingir uma pressão mínima aciona o motor elétrico.

Após a instalação elétrica do inversor de frequência foi necessário a parametrização para funcionamento correto para o motor do compressor.

Foi inserido os dados de placa do motor nos seguintes parâmetros do inversor como apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros do motor.

Parâmetros	Função	Valor Ajustado
P001	Parâmetro de acesso	5
P400	Tensão nominal do Motor	220V
P401	Corrente nominal do Motor	12.8A
P402	Rotação nominal do Motor	3475 RPM
P403	Frequência nominal do Motor	60 Hz
P404	Potência Nominal do Motor (CV)	5 CV
P406	Tipo de Ventilação do Motor	0 (Auto ventilado)

Fonte: O autor.

Dando prosseguimento ajustamos os parâmetros de tempo de rampa de partida do motor, desaceleração, em seguida configuramos os comando de acionamento Gira/Para, o Quadro 4 mostra os parâmetros nos quais foram feitas as alterações.

Quadro 4 - Parâmetros para partida.

<b>Parâmetros</b>	<b>Função</b>	<b>Valor Ajustado</b>
P100	Tempo de Aceleração	5s
P101	Tempo de Desaceleração	3s
P104	Largura da Rampa	100%
P133	Velocidade Mínima	3600 RPM
P134	Velocidade Máxima	3615 RPM
P169	Corrente Máxima de Saída	84.1A
P263	Função Entrada Digital 1 DI1	1(Gira/Para)

Fonte: O autor.

Após os ajustes notamos que o motor deveria trabalhar com uma velocidade acima dos dados de placa, devido ao inversor mostrar uma frequência inferior a 60Hz quando ajustado com a velocidade da placa.

## 7 RESULTADOS E DISCUÇÃO

A Corrente de partida de um MIT são corrente de curto período de duração, mas com altos valores, chegando em até 8 vezes a nominal, mas dependendo do motor essa corrente pode ser maior, devido o motor sair da inércia com carga no eixo.

### 7.1 Partida direta

Os primeiros resultados foram coletados com o motor em partida direta acionando o motor de 5CV, os dados foram coletados de minuto a minuto. A figura 32 apresenta o resumo das medições com Fluke 435.

Figura 32 - Resumo Partida direta.

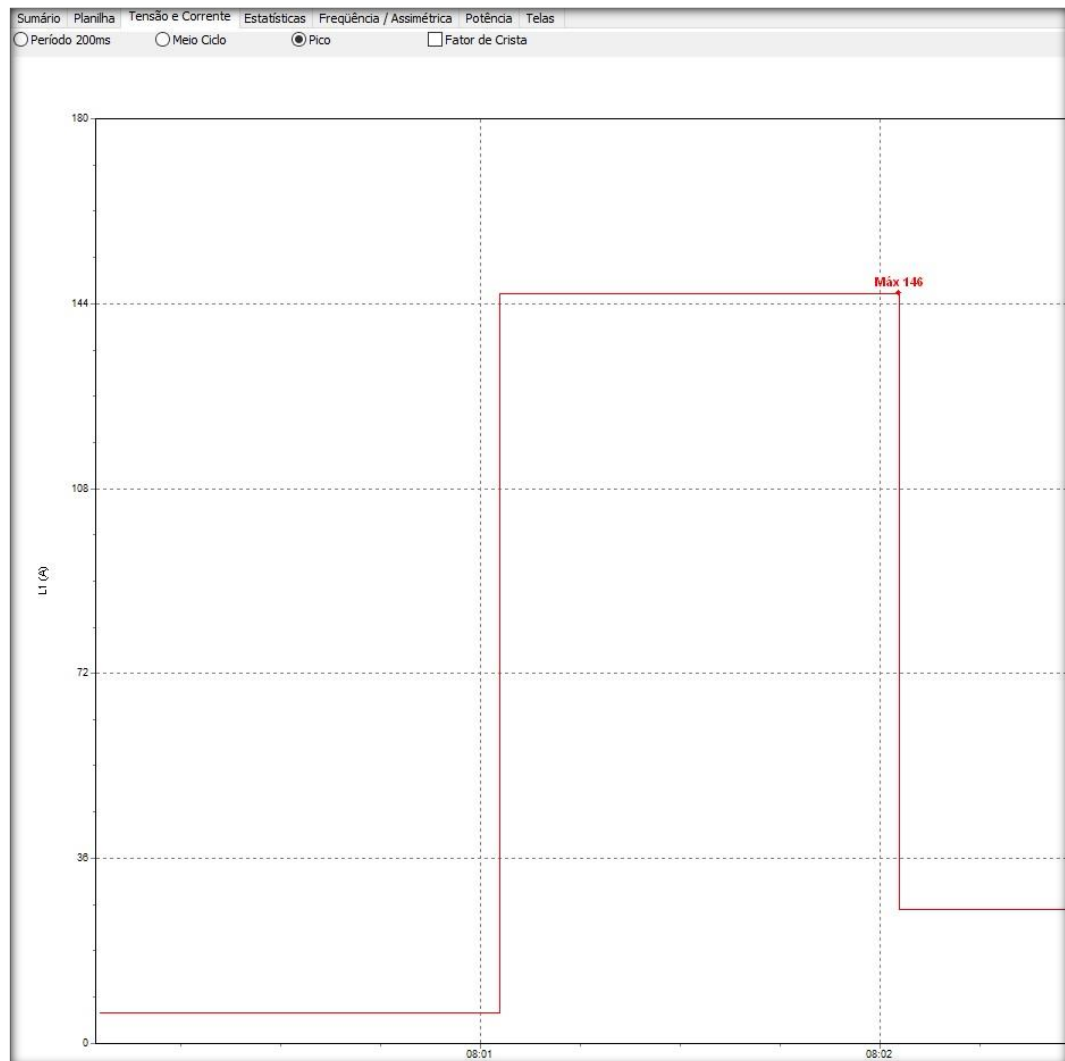
<b>Informação sobre o instrumento</b>	
Número do modelo	FLUKE 434/435
Número de série	N/D
Revisão de firmware	V02.10
<b>Informações do software</b>	
Versão do Power Log	Classic 4.6
Versão FLUKE 345 DLL	11.20.2006
Versão FLUKE 430 DLL	1.1.0.12
<b>Resumo da medição</b>	
Topologia de medição	Modo 3Ø em estrela
Modo de aplicação	Logger (Registrador)
Primeiro registro	09/09/2021 07:34:02 824msec
Último registro	09/09/2021 13:22:02 824msec
Intervalo de registro	0h 1m 0s 0msec
Tensão Nominal	230 V
Corrente Nominal	N/D
Frequência Nominal	60 Hz

Fonte: O autor.

Após realizar as análises como esse método de partida é possível constatar que a corrente de partida é muito elevada chegando ao um valor máximo de 146 amperes na fase 1 como podemos ver na Figura 33.



Figura 33 - Corrente de Pico Partida Direta.



Fonte: O autor.

Podemos também concluir que é uma corrente de 1 minuto de duração, após esse instante ao sair da inércia o motor entra em regime permanente consumindo uma corrente média de 23 amperes como apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Corrente nominal.

Sumário		Planilha		Tensão e Corrente		Estatísticas	
Corrente de Pico				L1			
<b>Sumário</b>							
De	09/09/2021 07:34:02						
Para	09/09/2021 13:22:02						
Valor máximo	24 A						
Em	09/09/2021 08:03:02						
Valor mínimo	2 A						
Em	09/09/2021 07:34:02						
μ	3,93696 A						
s	3,77325 A						
5% percentil	2 A						
95% percentil	8 A						
% [85% - 110%]	0%						
% [90% - 110%]	0%						
<b>Valores extremos superiores</b>							
Data / Hora	Valor						
09/09/2021 08:20:02	24						
09/09/2021 08:03:02	24						
09/09/2021 11:57:02	22						
09/09/2021 10:35:02	22						
09/09/2021 09:41:02	22						

Fonte: O Autor.

A partida direta para essa configuração de um motor de 5CV com a carga dos pistão do compressor eleva sua corrente de partida em 6 vezes a corrente de trabalho do sistema, fazendo com que os componentes do sistema de partida sejam subdimensionados.

## 7.2 Partida em rampa com inversor de frequência

Para a partida do compressor com o inversor de frequência, os dados foram coletados conforme a configuração da Figura 35 do medidor de qualidade de energia fluke.

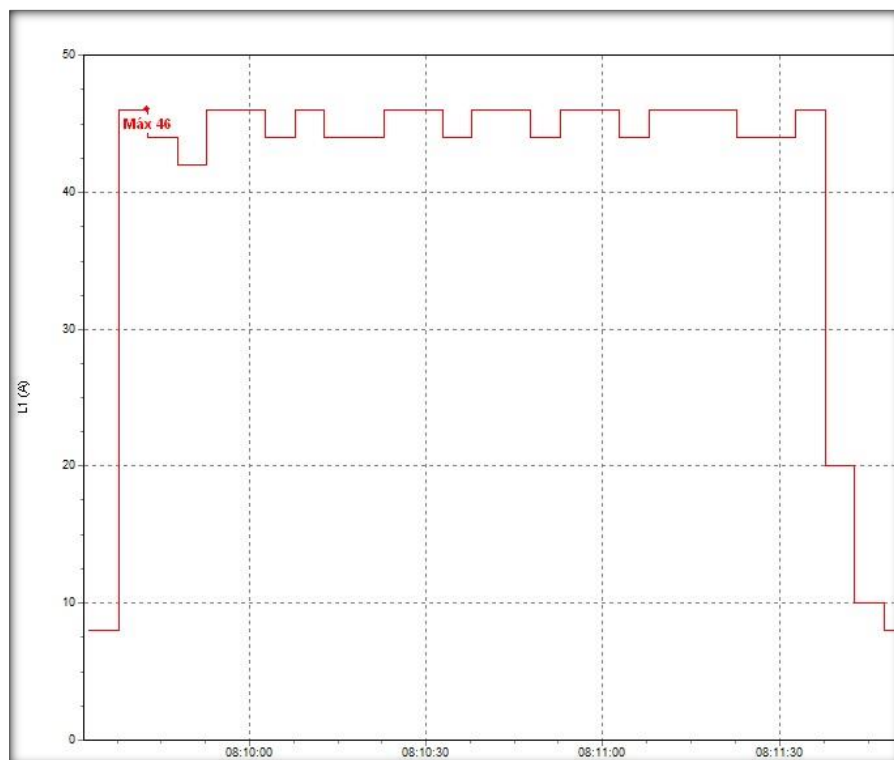
Figura 35 - Informações da configurações.

<b>Informação sobre o instrumento</b>	
Número do modelo	FLUKE 434/435
Número de série	N/D
Revisão de firmware	V02.10
<b>Informações do software</b>	
Versão do Power Log	Classic 4.6
Versão FLUKE 345 DLL	11.20.2006
Versão FLUKE 430 DLL	1.1.0.12
<b>Resumo da medição</b>	
Topologia de medição	Modo 3Ø em estrela
Modo de aplicação	Logger (Registrador)
Primeiro registro	24/09/2021 07:29:57 821msec
Último registro	24/09/2021 15:29:52 821msec
Intervalo de registro	0h 0m 5s 0msec
Tensão Nominal	230 V
Corrente Nominal	N/D
Frequência Nominal	60 Hz

Fonte: O Autor.

Ao estudar os resultados obtidos por esse ensaio constatamos que a corrente de partida do motor de indução trifásico diminuiu significativamente como a Figura 36 mostra a seguir.

Figura 36 - Corrente partida com inversor de frequência.



Fonte: O Autor.

A corrente de partida com o inversor de frequência passou a ser de 46 amperes mas seu período é de 2 minutos de duração duas vezes ao de partida direta. A corrente nominal do sistema não sofre nem uma alteração. Apenas passou a ser de menor duração.

### 7.3 Viabilidade de Custo

Para as empresas a utilização de métodos que geram redução no consumo energético e melhoria na qualidade da energia é preciso investimento no acionamento de motores elétricos. O quadro 5 indica o custo para cada tipo de partida para um motor de 5CV como utilizado no ensaio.

Quadro 5 - Custo de aquisição.

<b>Partida</b>	<b>Qts</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Custo</b>
Direta	01	Profit Automação	Painel Partida Direta Profit 5,0CV 220V Trifásico	R\$ 900,00
Inversor de frequência	01	WEG	CFW11 54A 20CV T4SZ 200-240V	R\$ 8.455,00

Fonte: O Autor

É claro que o custo do inversor de frequência é o de maior o em partida direta, assim tornando a partida direta ser o mais interessante, porem o inversor de frequência traz mais benéficos como:

- a) Controle da alimentação do motor, com as configuração dos dados de placa;
- b) Mais de um tipo de alimentação de entrada;
- c) Proteção contra distúrbios da rede elétrica;
- d) Um controle fino da velocidade de partida.
- e) Redução na corrente de partida

Esses fatores devem ser levado em consideração dependendo da instalação, pois o valor da queda de tensão gerada na partida direta por torná-la viável.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho traz um estudo sobre a ação da partida direta no compressor alternativo a pistão. A análise dos parâmetros relacionados a cada tipo de partida foram coletados dados reais em uma empresa de pequeno porte situada na cidade de Varginha, sul de Minas Gerais.

Com os dados coletados foram obtidas curvas de corrente de partida do motor para cada tipo de partida. Os estudos dessas curvas mostram que a corrente de partida tem um elevado pico de corrente devido o motor trabalhar com uma carga no eixo, esse tipo de desempenho é prejudicial a rede é realça a deficiência desse modo de partida direta para essa aplicação.

Partindo o motor em rampa com o inversor de frequência, o controle de velocidade apontou números esperados, uma corrente máxima de 31,5% da corrente de pico na partida direta sem fazer com que o motor perdesse torque na partida.

Os resultados obtidos mostram que houve uma redução no consumo do KW/h do compressor alternativo a pistão, pois mesmo ele tendo um período maior antes de entrar em regime permanente, sua potência consumida é menor em 34,63%.

A viabilidade de um inversor de frequência para esse tipo de aplicação, está além de uma aplicação para a partida, mas sim viabilizando uma futura mudança de rede elétrica de uma tal empresa, sem a necessidade de aquisição de um novo compressor de ar comprimido.

De modo geral os resultados mostram que o inversor de frequência tem um custo elevado comparado com partida direta, porém com a redução no consumo de energia ao longo prazo traz um viabilidade de instalação, visando que empresas de pequeno porte estão sujeitas a mudanças de instalações.

### 8.1 Ponto de continuidade

Como continuidade de estudo fica a sugestão de aplicação de um pressostato digital em conjunto com o inversor de frequência para controle PID na partida.

Também fica como sugestão de continuidade de estudo testes com outras velocidades e a verificação do aumento da vida útil do motor.

## REFERÊNCIAS

AMÉRICO, M., “**Eficiência energética Industrial-Módulo Acionamento Eletrônico**”, Procel Indústria/Eletróbrás, RJ,2004.

AMORIM, Priscila Silva de. **Aplicação de inteligência artificial no controle e automação de sistemas de ar comprimido com foco na eficiência energética**. Orientador: Prof. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino. 2010. 84 f. Mestrado (Pós-Graduação em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

ATLAS COPCO.**LE/LT compressores de pistão de alumínio lubrificados com óleo**. [S. l.], 1 jul. 2021. Disponível em: <https://www.airpresscompressores.com.br/diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-compressores-de-pistao/>. Acesso em: 20 maio. 2021.

ATLAS COPCO. **Manual do ar comprimido**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

CAPELLI, A. **Energia elétrica para sistema automáticos da produção**. São Paulo: Erica, 2007.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

Compressores: guia básico / Eletróbrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2009. 138 p.: il.

**DIFERENÇA entre Compressores de Parafuso e Compressores de Pistão**. [S. l.], 24 jun. 2019. Disponível em: <https://www.airpresscompressores.com.br/diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-compressores-de-pistao/>. Acesso em: 18 abr. 2021.

FERREIRA COSTA, Matheus Henrique. **ANÁLISE COMPARATIVA D A UTILIZAÇÃO DE DOIS EQUIPAMENTOS PARA PA RTIDA DIRETA DE MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO ROTOR GAI OLA DE ESQUILO: INVERSORES DE FREQUÊ NCIA X CHAVES DE PARTIDA ESTÁTICA (SOFT-STARTER)**. Orientador: Prof. José Pereira da Silva Neto. 2014. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação e Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FISCHER, PEDRO ARMANDO, "**Proteção, Partida e Comando de Motores de Indução Trifásicos**", O Setor Elétrico – 2006.

FRANCHI, Claiton Moro, "**Inversores de Frequência – Teoria e Aplicações**", Érica, 2ª edição. São Paulo - 2009.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 3. Ed São Paulo: Érica, 2008.

GARCIA, D. **COMPRESSORES**, SENAI/ Conceição do Mato Dentro, 2012

HAHN, A. **Eficiência energética industrial**: compressores: guia avançado. Eletrobrás/Procel. Dez. 2004.

MARIA, Lucila. **Compressor Parafuso**, Instituto Federal de Santa Catarina Campus São Jose, 2012.

NASCIMENTO, Adilson. **Comandos Elétricos**. Apostila, Cap. 1. 45 f. Valinhos, 2015. Disponível em: < <http://www.seaan.com.br/cursos/comandos-eletricos-basico/apostila/> >. Acesso em: 20 abr. 2021.

OLIVEIRA, W.R., (2013). **Uma avaliação sobre inversores de frequência e distorções harmônicas e inter-harmônicas**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 02/2013, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília,DF.

OR 181-01: **Manual de Operação e Manutenção**. São Paulo - SP: Or Brasil, 2018. 8 p. Disponível em: [https://www.orbrasil.com.br/admin/dist/img/produtos/\\_ed714b161e22098d15eb490a7c1c662c.pdf](https://www.orbrasil.com.br/admin/dist/img/produtos/_ed714b161e22098d15eb490a7c1c662c.pdf). Acesso em: 5 jul. 2021.

PARR, A. A. **Hidraulics and Pneumatics**. Elsevier Science & Technology Books, March 1999.

PASETTI, Giovanni. **Acionamentos Pneumáticos e Hidráulicos, Instituto Federal Catarinense**, 2016.

PERRONE, F.P.D; AFONSO, S.; CAVALCANTE, E.S.C.; CAPELLA, P.S. A solução no caso DaimlerChrysler para redução do consumo de energia em sistemas de ar comprimido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16. **Anais...** Campinas, 2001.

ROCHA, C.R.; MONTEIRO, M.A.G. **Eficiência energética em sistema de ar comprimido**: manual prático. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ROLLINS, J.P. **Manual de ar comprimido e gases**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

SARKIS, Sávio Raidel Matos. **Compressores para processo industrial**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica- 2002.

SCHULZ COMPRESSORES. **MAX MSV 20/250 - Schulz**. [S. l.], 23 fev. 2021. Disponível em: <https://www.schulz.com.br/produto/max-msv-20-250/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

SCHULZ COMPRESSORES. **SRP 4000 - Schulz**. [S. l.], 23 fev. 2021. Disponível em: <https://www.schulz.com.br/produto/srp-4000/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

SCHULZ. **Manual de instruções**: compressores alternativos de pistão. Joinville, SC: SCHULZ, julho 2012. 63 p.

WEG. **Motor elétrico:** Guia prático de treinamento técnico comercial. Jaraguá do Sul, SC: WEG,2016

WEG. **Motor elétrico:** Guia prático de treinamento técnico comercial. Jaraguá do Sul, SC: WEG,2016

WEG. **Inversor de Frequência:** CFW-09. 4.4. ed. Jaraguá do Sul, SC: WEG, 2011. 362 p.