

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

OSMAR FRANCISCO ZAPAROLI JUNIOR

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE INJETADOS EM UMA
EMPRESA DE MATERIAIS PARA ESCRITÓRIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2019**

OSMAR FRANCISCO ZAPAROLI JUNIOR

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE INJETADOS EM UMA
EMPRESA DE MATERIAIS PARA ESCRITÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim.

Orientador: Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres

**ERECHIM - RS
2019**

OSMAR FRANCISCO ZAPAROLI JUNIOR

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR DE INJETADOS EM UMA
EMPRESA DE MATERIAIS PARA ESCRITÓRIO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica,
Departamento de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Campus de Erechim.**

Erechim, 28 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres (Orientador)
URI - Erechim



Prof.^a. Me. Camila Sampaio dos Reis (Examinadora)
URI - Erechim



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI - Erechim

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço aos meus pais e minha namorada pelo apoio e compreensão nesses anos de estudo e, por me motivarem, auxiliando em todas as dificuldades.

Aos meus colegas e amigos por todos os finais de semana e madrugadas de estudo e apoio.

A todos os professores, por todo o conhecimento compartilhado, tanto profissionais quanto pessoais, em especial ao meu orientador Prof. Fernando Luis Tartari Peres, por me auxiliar neste estudo.

A organização em estudo, por abrir as portas para realizar o estudo de melhorias.

“We have to do the best we can. This is our sacred human responsibility.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com o crescimento da demanda e o investimento em energia elétrica, a busca por sistemas com maior eficiência energética torna-se cada vez mais necessário. Com base nisso, o presente estudo, tem como objetivo, a redução de consumo de energia em um setor de injeção de plásticos. Por meio de revisão bibliográfica, foi elaborado o embasamento necessário para realizar uma auditoria de eficiência energética neste setor. Além disso, foi feito também uma análise sobre componentes de automação e acionamentos aplicados com eletrônica de potência, para tornar possível os projetos de melhoria visando a eficiência do sistema. Para a realização do estudo foi utilizado o analisador de energia RE6000. A coleta dos valores no ponto de maior consumo do setor mostra um desperdício de energia. Ensaio por meio de protótipos com acionamento automatizado e controle de malha aberta alcançaram uma redução de 35% no consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: Eficiência energética. Automação. Acionamentos.

ABSTRACT

With the rising demand and investment in electricity, the search for more energy efficient systems is becoming increasingly necessary. Based on this, the present study, aims, reduce the energy consumption in a plastic injection industry. Through bibliographic review, was elaborated the basemet required to perform an energy savings audit in this sector. Besides that, an analysis was also made of automation components and drives applied with power electronics, to enable system efficiency improvement projects. To perform this study, the energy analyzer RE6000 was used. Collecting the values at the industry's highest consumption point shows a waste of energy. Automated drive prototyping and open loop control tests achieved a 35% reduction in electricity consumption.

Keywords: Energy efficiency. Automation. Drives.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação entre consumo de energia elétrica e emissão de gás CO ₂	13
Figura 2 - Estrutura de uma máquina injetora de plástico	16
Figura 3 - Ciclo de injeção de plásticos.....	16
Figura 4 - Consumo energético por setor em GWh no Brasil	17
Figura 5 - Partida direta e estrela triângulo	21
Figura 6 - Freio de Foucault clássico.....	22
Figura 7 - Diagrama de blocos do funcionamento do inversor de frequência.....	23
Figura 8 - Variação da tensão e frequência em (V/F).....	24
Figura 9 - Curva de operação do inversor	25
Figura 10 - Soft-Starter.....	25
Figura 11 - Diagrama de blocos de uma soft-starter	26
Figura 12 - Tensão aplicada na partida.....	26
Figura 13 - Curva de partida suavizada com soft-starter.....	27
Figura 14 - Conjunto de elementos de uma malha de controle	27
Figura 15 - Controle em malha aberta	28
Figura 16 - Controle em malha fechada	28
Figura 17 - Estrutura do CLP	29
Figura 18 - Elementos básicos em Ladder.....	29
Figura 19 - Sistema de acionamento atual.....	31
Figura 20 - Controlador atual	32
Figura 21 - Dados do motor atual.....	33
Figura 22 - Malha de controle projetada	33
Figura 23 - Fluxograma do funcionamento da máquina.....	34
Figura 24 - Velocidades pré-definidas do inversor	35
Figura 25 - Programação em Ladder do CLP.....	36
Figura 26 - Comunicação entre CLP e Inversor.....	36
Figura 27 - Dados do motor utilizado na prototipagem.....	37
Figura 28 - Dados do inversor de frequência utilizado na prototipagem	38
Figura 29 – Protótipo montado em bancada.....	39
Figura 30 - Analisador de energia	39
Figura 31 - Esquema de ligação do analisador	40
Figura 32 - Relação de autonomia para gravação de dados	40

Figura 33 - Planilha para cálculo de retorno do investimento.....	41
Figura 34 - Consumo atual do motor em W (data: 04/06/2019)	43
Figura 35 - Consumo atual do motor em W (data:30/10/2019)	43
Figura 36 - Consumo projetado em Watts.....	44
Figura 37 - Redução de consumo diário em Quilowatts	44
Figura 38 - Redução do consumo diário em reais	45
Figura 39 - Consumo projetado em W	45
Figura 40 - Consumo do protótipo sem automação em Watts	46
Figura 41 - Consumo do protótipo sem automação de 15:09h até 16:01h.....	47
Figura 42 - Consumo do protótipo sem automação de 16:12h até 16:57h.....	47
Figura 43 - Consumo do protótipo sem automação de 15:19h até 17:58h.....	48
Figura 44 - consumo do protótipo sem automação de 18:09h até 19:53h.....	48
Figura 45 - Consumo do protótipo com automação em Watts.....	49
Figura 46 - Consumo do protótipo com automação de 15:09h até 16:01h	49
Figura 47 - consumo do protótipo com automação de 16:12h até 16:57h	50
Figura 48 - Consumo do protótipo com automação de 17:19h até 17:58h	50
Figura 49 - Consumo do protótipo com automação de 18:06h até 19:39h	50
Figura 50 - Redução de consumo em <i>stand-by</i> com automação	51
Figura 51 - Comparação de consumo energético em curto tempo	51
Figura 52 - Redução de consumo em reais por mês pelo protótipo	52
Figura 53 - Retorno do investimento.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de condições e frequências do inversor	42
Tabela 2 – Relação do gráfico escalar do projeto	42
Tabela 3 – Relação do gráfico escalar do protótipo	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SCGE	Sistema de Controle e Gerenciamento de Energia
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PWM	Pulse Width Modulation
CLP	Controlador Lógico Programável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Processo de Injeção	15
2.2 Energia	16
2.3 Eficiência Energética.....	17
2.3.1 Levantamento de Dados	18
2.3.2 Definição de Cargas de Maior Consumo	18
2.3.3 Realização de Projeto Para Eficiência Energética	19
2.4 Freio de Foucault.....	21
2.5 Motores Elétricos de Indução	20
2.6 Tipos de Acionamentos	20
2.7 Acionamentos Aplicados com Eletrônica de Potência	22
2.7.1 Inversores de Frequência	22
2.7.2 Soft-Starter.....	25
2.8 Automação	27
2.9 Controladores Lógicos Programáveis	28
3 METODOLOGIA	31
3.1 Produção de Injetados	31
3.2 Cuidados para Automação	33
3.3 Simulações.....	34
3.4 Prototipagem.....	36
3.4.1 Especificação de materiais	37
3.5 Análise de consumo	39
3.6 Cálculo de retorno	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1 Projeto	42
4.2 Análise de redução de consumo energético utilizando inversor	43
4.3 Redução de consumo utilizando Soft-starter	45
4.4 Resultados da prototipagem	46
4.4.1 Sistema sem automação	46
4.4.2 Sistema com automação	48
4.5 Retorno de investimento	53
5 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	55

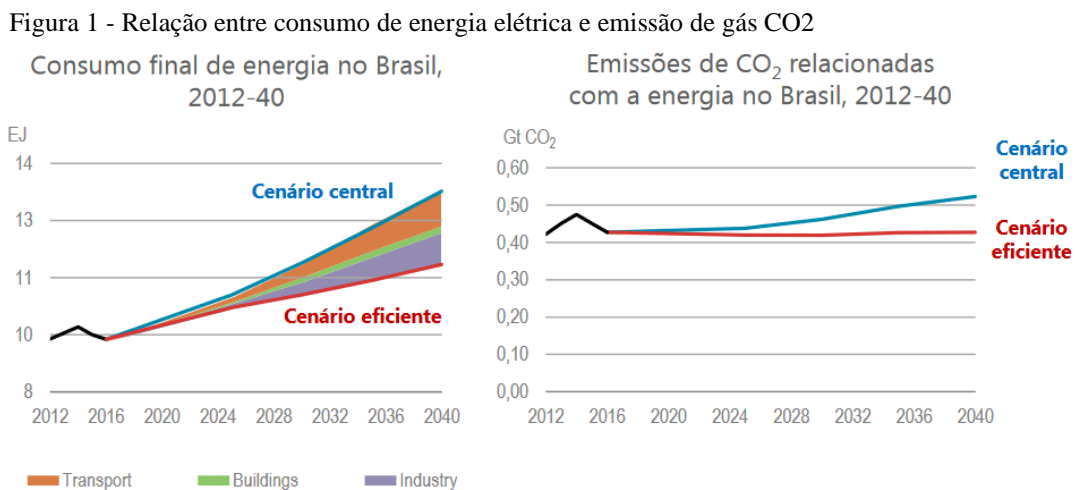
1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica para a produção na indústria é fundamental, pois a maioria dos processos são realizados por equipamentos que necessitam de eletricidade para funcionar. O Brasil é um grande gerador de energia elétrica, composto por uma matriz energética predominante hídrica.

A eficiência energética é uma solução para o consumo de energia elevado que existe no país. Essa área da engenharia atinge não somente as usinas geradoras, mas também pequenas e grandes indústrias com reduções de custos.

Segundo Oliveira, Matos e Black (2017), a indústria 4.0 é o termo dado ao projeto do governo Alemão que em seu fundamento básico apresenta entre seus pilares o *supply chain* que visa a intercomunicação de máquinas para redução de custos. A indústria 4.0 é cada vez mais o alvo das empresas brasileiras da região sul e para isso a eficiência energética é fundamental.

Além da economia em custos, a eficiência energética traz benefícios com relação ao meio ambiente. A Figura 1, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2019), mostra a relação entre a prática da eficiência energética e a redução na emissão de gás CO₂, bem como uma projeção, caso políticas de eficiência sejam adotadas.



As evoluções tecnológicas em diversos campos da engenharia elétrica possibilitam utilizar dispositivos de forma que os equipamentos atuem para reduzir o consumo de energia elétrica. Inversores de frequência e *Soft-starter* são dois exemplos, dois avanços da eletrônica de potência que quando controlados corretamente podem reduzir a potência consumida em certos processos industriais.

Eficiência energética é tomada como prioridade na política de diversos países. São poucos os países que não estabelecem metas para reduzir o consumo de energia visando a redução de gases de dióxido de carbono (OECD; IEA, 2014).

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são classificados em geral e específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Comprovar a redução de consumo energético ao realizar a automação do acionamento da pressurização de uma injetora, realizando uma proposta de implementação da automação nesta máquina, comparando diferentes chaves eletrônicas para acionamento formulando o melhor projeto para redução de consumo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Propor automação para o acionamento da máquina injetora;
- Realizar cálculos e análises do consumo energético;
- Implementar soluções para redução do consumo de energia;
- Realizar orçamento e tempo de retorno do investimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado a contextualização sobre o que é eficiência energética, como ela está sendo vista no mundo atualmente, além de um embasamento sobre o processo de injeção.

O sistema de partida do motor existente na máquina é do tipo estrela-triângulo, não sendo possível a implantação de automação ou controle que torne a partida eficiente, propiciando um melhor aproveitamento da energia.

2.1 Processo de Injeção

O plástico está sendo cada vez mais utilizado no dia-a-dia. Os polímeros sintéticos que surgiram na década de XIX, vem cada vez mais substituindo materiais como madeira, vidro e metal em diversas aplicações (DOMINGUES, 2016).

Para Ribeiro (2009), o processo de moldagem pode ser definido como a transformação cíclica de termoplásticos em termofixos, ou seja, várias etapas do processo são executadas uma ou mais vezes na mesma máquina (Figura 2).

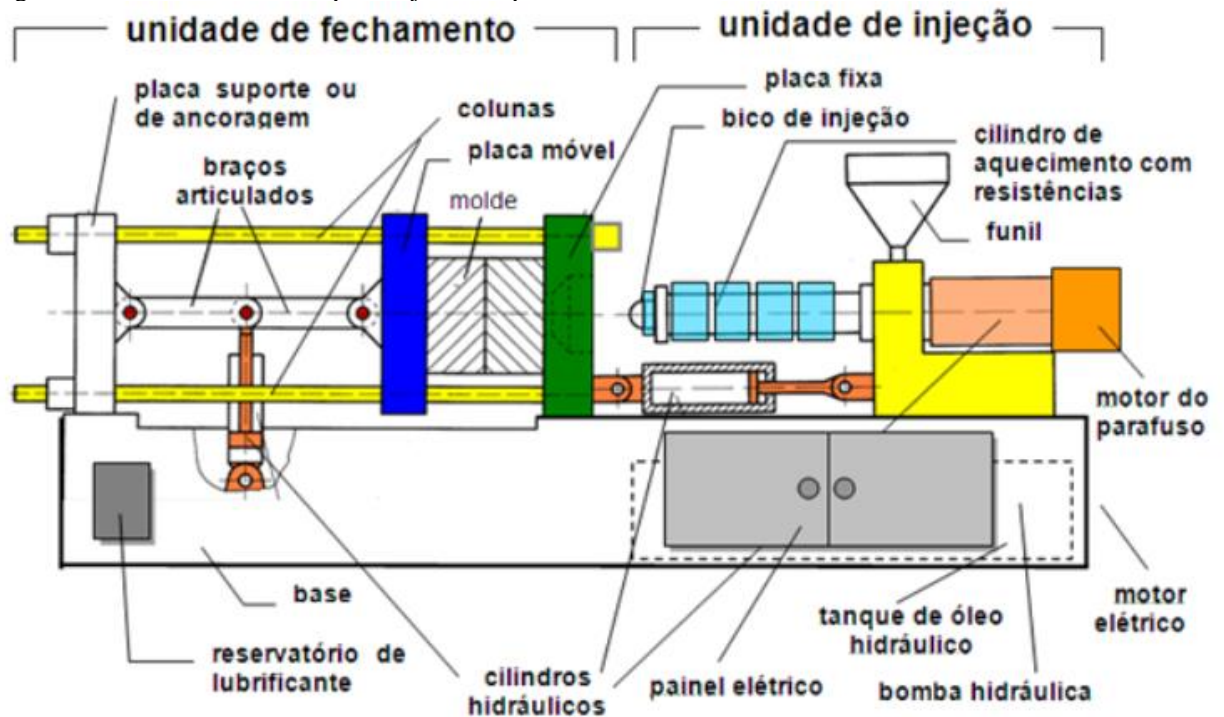
O processo de molde se divide em três partes (RIBEIRO, 2009):

- **Plastificação:** por meio de aquecimento tornar o material plástico maleável capaz de ser moldado.
- **Preenchimento e Pressurização:** Para que o material preencha o molde desejado, é necessário que seja comprimido e pressurizado contra as paredes do molde, para então reproduzir sua forma desejada.
- **Resfriamento:** O resfriamento faz-se necessário pois é responsável por dar a rigidez ao material mantendo assim a forma do molde.

A figura 3 mostra de uma forma quantitativa o tempo gasto em cada etapa do processo de injeção. Verifica-se que a parte de pressurização não chega à um quarto do processo, ou seja, o sistema de bombeamento de óleo pode ficar inativo durante todo o restante da fabricação da peça (DOMINGUES, 2016).

A fase de pressurização é onde ocorre o maior consumo instantâneo da máquina (potência mais elevada) devido ao tamanho da máquina elétrica que está acoplada no equipamento e também aos elevados valores de pressão exigidos durante este processo (THIRIEZ, 2004).

Figura 2 - Estrutura de uma máquina injetora de plástico



Fonte: Ribeiro (2009) apud. CFET (2004).

Figura 3 - Ciclo de injeção de plásticos



Fonte: Domingues (2016).

2.2 Energia

A energia elétrica é um insumo fundamental para a garantia do desenvolvimento econômico e social de um país. Isso implica que o consumo de energia seja realizado de forma

racional, visando a sua maior utilidade, ou seja, consumir menos para produzir a mesma quantidade tornando os sistemas elétricos eficientes (ELETROBRÁS, 2005).

Empresas que buscam ter uma maior competitividade necessitam uma consciência de eficiência energética, já que, ela reduz os custos de energia e, conseqüentemente, da produção. O valor agregado dos produtos diminui quando se tem economia energética (seja mecânica, elétrica, humana, etc.) para produzi-los (ELETROBRÁS, 2005).

Segundo Schmidt (2004), existem diversos tipos de consumidores de energia elétrica, sendo eles o residencial, comercial e industrial. A demanda de energia elétrica de qualquer parte consumidora, busca o mesmo objetivo, que é fazer determinado aparelho elétrico ou máquina elétrica funcionar. Na Figura 4 é possível ver como está a situação atual do país com relação ao consumo de energia.

Figura 4 - Consumo energético por setor em GWh no Brasil

	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)	Part. % (2017)"	
Brasil	463.142	474.823	465.708	461.780	467.161	1,2	100	Brazil
Residencial	124.908	132.302	131.190	132.872	134.368	1,1	28,8	Residential
Industrial	184.685	179.106	169.289	165.314	167.398	1,3	35,8	Industrial
Comercial	83.704	89.840	90.768	87.873	88.292	0,5	18,9	Commercial
Rural	23.455	25.671	25.899	27.266	28.136	3,2	6,0	Rural
Poder público	14.653	15.355	15.196	15.096	15.052	-0,3	3,2	Public Sector
Iluminação pública	13.512	14.043	15.333	15.035	15.443	2,7	3,3	Public lighting
Serviço público	14.847	15.242	14.730	14.969	15.196	1,5	3,3	Public service

Fonte: EPE (2018)

A tabela mostra um crescimento no consumo de energia em diversos setores, principalmente no setor industrial, que entre 2016 e 2017 apresentou um aumento no consumo de energia elétrica de 1,3%. Em uma projeção realizada pela EPE em 2017 foi apontado que o setor industrial irá aumentar 3% ao ano até 2026.

2.3 Eficiência Energética

A eficiência energética vem se tornando um objetivo primordial para proprietários e gestores das organizações, isso em razão das economias financeiras que podem ser notadas desde o início da sua implementação. A redução do consumo energético traz lucros que cativam as empresas a aplicar essa metodologia em suas plantas industriais (MITOLO, et. al., 2019).

Uma auditoria energética é definida como uma inspeção sistemática do consumo de energia de um local, seja ele um complexo de residências ou uma planta industrial. Tem como objetivos estabelecer fluxos de energia, identificando o potencial para melhorias de eficiência energética afim de relatar para ao proprietário quais pontos podem gerar melhorias (SERRENHO; BERTOLDI; CAHILL, 2014).

Segundo Serrenho, Bertoldi e Cahill (2014), uma auditoria de eficiência energética deve se basear nos seguintes passos:

- Levantar tarifas de energia e basear-se em dados de consumo energético atualizados e medidos;
- Realizar revisões detalhadas sobre os pontos com consumo relevante;
- Realizar o projeto de melhoria e *payback* abordando ciclos de vida dos equipamentos;
- Fazer auditorias até que seja possível formar uma imagem clara do desempenho energético e para permitir a identificação das oportunidades mais significativas de melhoria.

2.3.1 Levantamento de Dados

O primeiro passo visa desenvolver uma avaliação global do consumo energético para o efeito de redução nas contas de energia, para isso é necessário quantificar a energia consumida (KADDARI; MOUDEN; HAJJAJI, 2018).

Existem diversas formas de fazer essa primeira inspeção, a mais usual é uma caminhada na planta fabril e visualmente inspecionar pontos onde possuem um mal-uso de energia, seja um equipamento mal dimensionado, um sistema de resfriamento mal controlado, entre outros (SERRENHO; BERTOLDI; CAHILL, 2014).

2.3.2 Definição de Cargas de Maior Consumo

A segunda etapa é o desenvolvimento de uma abordagem para calcular e escolher indicadores de desempenho estabelecendo o balanço de energia na instalação de cada local a fim de direcionar os itens que consomem mais energia. Para isso são utilizados medidores elétricos, que fazem a análise do consumo de energia (KADDARI; MOUDEN; HAJJAJI, 2018).

Sola e Mota (2012), utilizam um modelo de decisão multi-atributo para seleção de cargas onde são necessárias mudanças a fim de conseguir um bom desempenho relacionado a eficiência energética. Para a seleção dos melhores pontos de eficiência energética devem ser analisados os seguintes dados:

- Custo de energia;
- Consumo do equipamento;
- Risco de perdas na produção;
- Eficácia do sistema atual.

Para Thumman e Younger (2008), a seleção do equipamento pode ser feita de diversas formas. A mais utilizada é realizar uma visita na planta industrial e verificar os pontos que tem maior consumo. Isso pode ser realizado, visualizando placas de identificação de máquinas e avaliando qual a possibilidade de modificar o acionamento e o controle dos sistemas, visando a redução de consumo energético.

2.3.3 Realização de Projeto Para Eficiência Energética

O terceiro passo implica que é necessário iniciar o desenvolvimento de ações de melhoria. Segundo Kaddari, Mouden e Hajjaji (2018), é necessário projetar analisando 3 quesitos: técnico, econômico e ecológico. Isso significa que a avaliação deve levar em consideração vários fatores, e o processo de tomada de decisão é crucial a partir deste momento.

Para Thumman e Young (2008) a energia pode ser economizada utilizando Sistemas de Controle e Gerenciamento de Energia (SCGE). O aumento dos custos de energia e a redução dos preços de computadores e microprocessadores facilitam os estudos de eficiência energética. Um SCGE pode controlar eficientemente o aquecimento, a ventilação, motores e outros equipamentos consumidores de energia das plantas.

Os princípios básicos de controle para a conservação de energia são (THUMMAN; YOUNGER, 2008):

- Operar o equipamento somente quando necessário;
- Eliminar ou minimizar o aquecimento e o resfriamento simultâneos;
- Fornecer aquecimento e arrefecimento de acordo com as necessidades reais;
- Gerar aquecimento e arrefecimento a partir da fonte mais eficiente.

Utilizando desses métodos Jugartis, Topchiy, Kravchuck e Shevchuck (2016), realizaram um estudo de eficiência energética onde foi possível constatar reduções significativas em diversos setores, por meio das auditorias de eficiência energética.

2.4 Motores Elétricos de Indução

Máquinas elétricas são dispositivos ou equipamentos capazes de realizar conversão eletromecânica em energia elétrica, podendo ser divididas em dois grandes grupos: motores e geradores. Motores CA convertem energia elétrica em mecânica e são amplamente utilizados pelo menor custo comparado aos outros tipos de motores (PETRUZZELA, 2010).

Os motores elétricos de indução podem ser divididos em duas grandes áreas com características construtivas diferentes, sendo eles o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado. Segundo Franchi (2013), os motores que utilizam gaiola de esquilo são muito mais utilizados, isso se deve ao fato da ausência de escovas, comutadores e são de baixo custo ao contrário do rotor bobinado.

Os motores com maior utilidade nas indústrias são baseados no modelo gaiola de esquilo esse modelo de máquina é construído basicamente por um circuito magnético estático (estator), bobinas e o rotor. O motor quando energizado atua como um transformador que tem seu terminal secundário em curto, ou seja, ele exige uma corrente muito maior que a nominal podendo chegar a atingir até sete vezes a corrente nominal no período de acionamento (FRANCHI M.C., 2013).

2.5 Tipos de Acionamentos

Acionamento elétrico é o processo de transformação de energia elétrica em energia mecânica. Normalmente são utilizados para acionar máquinas ou equipamentos que requerem algum tipo de movimento controlado como, por exemplo, bombas (COSTA, 2014).

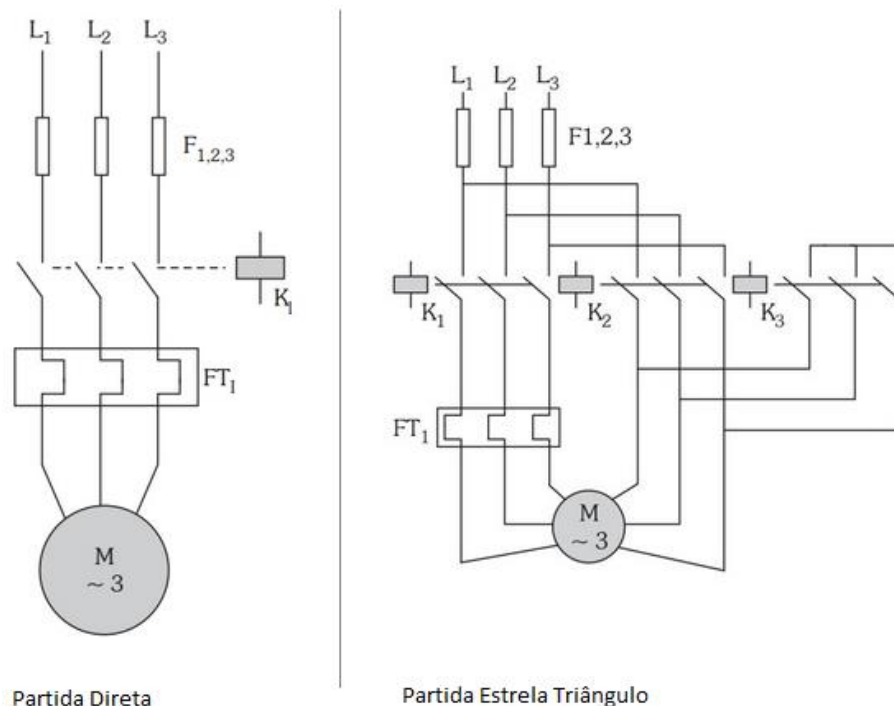
Existem diversos tipos de partidas (eletromecânicas e eletrônicas). Esta revisão elucida dois tipos amplamente utilizados (figura 6):

- Partida direta: O motor é acionado diretamente por um contator. Apesar da simplicidade, este tipo de acionamento consome uma energia muito elevada na partida. Este consumo é devido às características construtivas dos motores elétricos, podendo chegar até 10 vezes o valor da corrente nominal. Por esse motivo só é utilizado em motores de pequeno porte e que não seja acionado diversas vezes (COSTA, 2014).

- Partida Estrela-Triângulo: Neste tipo de partida, se faz necessário o uso de um motor que tenha dupla tensão de acionamento. Também se tem uma redução de corrente elétrica que pode chegar à 1/3 da corrente de partida. Sendo o torque diretamente proporcional à corrente, também é reduzido em 1/3 (COSTA, 2014).

Em um estudo comparativo Pereira, Contessi, Rosseti, Rosso e Tassi (2012) constataram que a partida direta e a partida estrela-triângulo são formas de acionamentos ineficientes por diversos fatores. Dentre os principais motivos por essa baixa eficiência estão: alto consumo na partida direta. E na chave estrela-triângulo, apesar de reduzir a corrente em 1/3, requer um motor com dupla forma de ligação e o torque de partida é reduzido.

Figura 5 - Partida direta e estrela triângulo



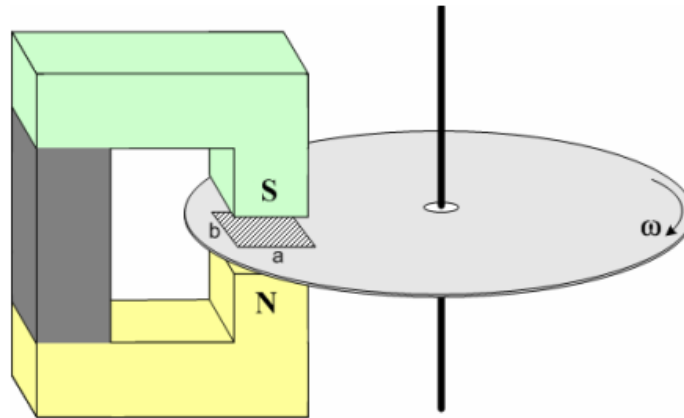
Fonte: Adaptado de Franchi (2014)

2.6 Freio de Foucault

O uso de correntes parasitas na frenagem eletromagnética é bastante utilizado, tanto em meio industrial como acadêmico. Grande parte dos trabalhos envolvendo a frenagem eletromagnética disponível na literatura, aborda aplicações em elementos rotativos (motores elétricos) (PINHEIRO R.F. 2014).

O freio de Foucault clássico que será utilizado neste trabalho para prototipagem representado na Figura 6 apresenta o funcionamento a seguir: é montado um disco de alumínio entre duas bobinas polarizadas para inserir resistência mecânica ao eixo de máquinas elétricas. Com isso é possível simular uma carga de qualquer valor. (BATISTA A.D., 2000).

Figura 6 - Freio de Foucault clássico



Fonte: Pinheiro 2014

2.7 Acionamentos Aplicados com Eletrônica de Potência

Conforme Franchi (2013), com o advento da eletrônica de potência, está se tornando muito viável economicamente o uso das chaves eletrônicas em partidas e controle de motores. Circuitos eletrônicos de potência convertem a potência elétrica utilizando dispositivos eletrônicos que funcionam como chaves que modificam os valores de tensão e corrente (ARRABAÇA, 2012).

A eletrônica de potência inclui diversas aplicações e essas vão de miliwatts até megawatts. O avanço na capacidade dos dispositivos semicondutores de chaveamento eletrônico possibilitou um avanço na área industrial, mais especificamente para partida e controle de velocidade de motores (ARRABAÇA, 2012).

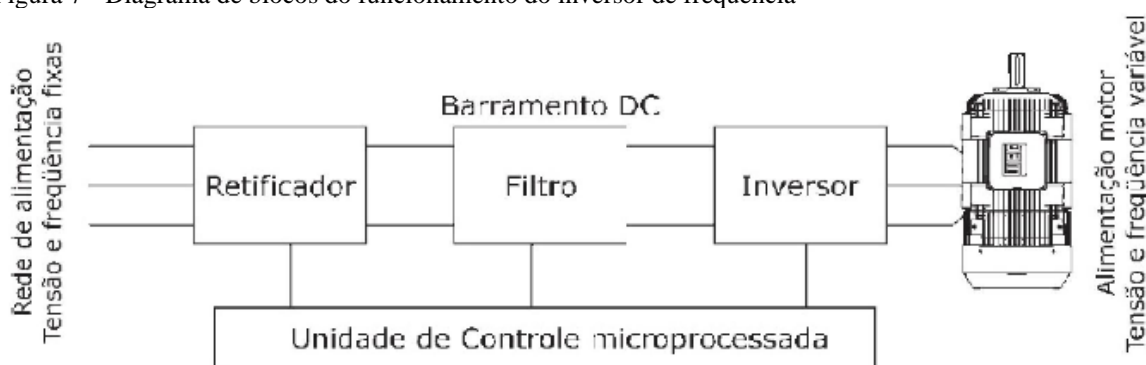
2.7.1 Inversores de Frequência

Conforme Nascimento (2013), inversores de frequência, também conhecidos por conversores de frequência, são dispositivos que possibilitam a variação de velocidade de motores de indução trifásicos, permitindo modular a velocidade do motor junto do processo.

Franchi (2013) afirma que o método mais eficiente para controle de velocidade de motores de indução trifásico, com menores perdas no dispositivo é o inversor de frequência, atuando na variação da frequência alimentadora por meio de conversores.

Para entender melhor é possível analisar o diagrama de blocos da Figura 7.

Figura 7 - Diagrama de blocos do funcionamento do inversor de frequência



Fonte: Silva (2017).

O primeiro bloco é responsável pela retificação do sinal alternado recebido da rede de alimentação que chega da rede de Corrente Alternada (CA) para Corrente Contínua (CC). A configuração mais comum para realizar esse processo é uma ponte de diodos de onda completa. (NASCIMENTO, 2013)

O segundo bloco consiste em um banco de capacitores eletrolíticos e circuito com filtragem de altas frequências, que permitem uma suavização das variações de tensão e gera uma saída com tensão CC fixa (NASCIMENTO, 2013).

No terceiro bloco existe um circuito inversor, composto por transistores *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), que chaveiam a tensão CC que está entrando no circuito, gerando uma saída pulsada, também conhecida por *Pulse Width Modulation* (PWM). Os sinais obtidos são trens de pulsos variáveis, que ao serem adicionados em cargas indutivas como motores resultam próximo de um sinal senoidal (NASCIMENTO, 2013).

Conforme Capelli (2013) o inversor de frequência é um dos principais dispositivos para automação industrial, isso se deve a contribuição para otimização de plantas fabris em processos contínuos ou de manufatura.

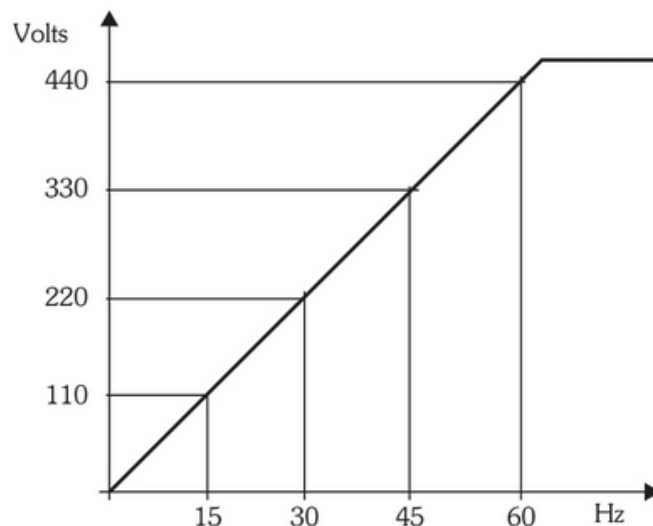
O seu uso se faz muito viável no meio industrial pelas seguintes vantagens (CAPELLI, 2013):

- Otimização de processo: o aparelho diminui as perdas e consumo de matéria e de energia elétrica.

- Suavização de operação de máquinas: Com o inversor de frequência as partidas bruscas são reduzidas, isso porque o aparelho contém diversos tipos de parâmetros para aceleração e frenagem em rampa.
- Economia de energia elétrica: O inversor quando bem parametrizado pode controlar os motores de forma que só funcione quando necessário reduzindo custos. Dois exemplos clássicos são bombas e ventiladores em que o consumo pode ser reduzido ao cubo.

Uma das características mais importantes do inversor de frequência com controle escalar, é a relação direta e linear que existe entre a tensão e a frequência (V/F) (CAPELLI, 2013). A Figura 8 mostra um gráfico para um motor de 440V e uma frequência de rede em 60 Hz.

Figura 8 - Variação da tensão e frequência em (V/F)

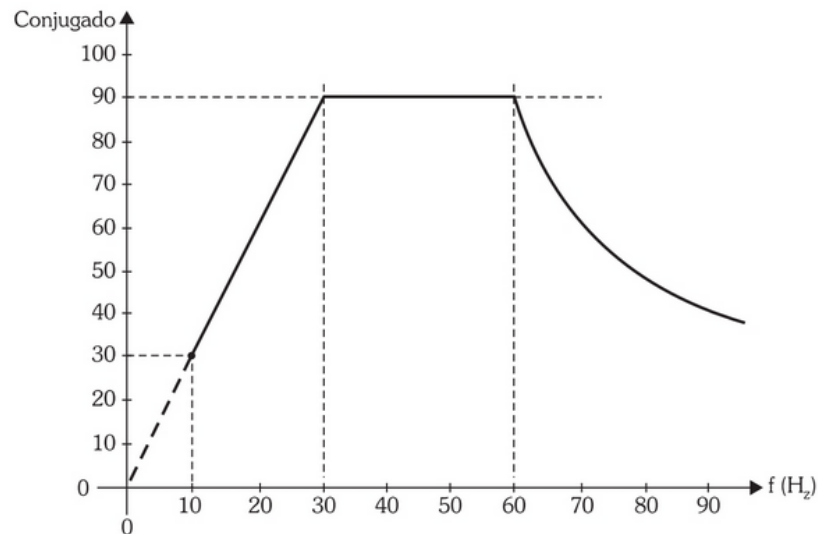


Fonte: Franchi (2013)

Os inversores variam automaticamente a tensão, proporcionalmente à frequência aplicada na armadura do motor. Estes dispositivos possuem um fator de precisão que fica entre 3 e 5%. Esse erro pode ocorrer devido a utilização no controle escalar, pois ele não possui um sistema com realimentação, ou seja, não é possível levar a carga em consideração (FRANCHI, 2013).

Os fabricantes dos motores sugerem uma curva operacional (Figura 9) que vai de 10 a 60 Hz para evitar que ocorram danos na máquina elétrica, para operar abaixo da região de trabalho especificada pelo fabricante são necessárias adaptações como ventilação forçada independente ou aumentar a classe de isolamento das bobinas (FRANCHI, 2013).

Figura 9 - Curva de operação do inversor



Fonte: Franchi (2013)

Fonseca (2015) realizou uma análise comparativa entre um sistema com uma bomba centrífuga em operação convencional (partida estrela-triângulo) e com a automação. Inserindo um inversor de frequência, o equipamento obteve uma redução no consumo de energia de 21%.

2.7.2 *Soft-Starter*

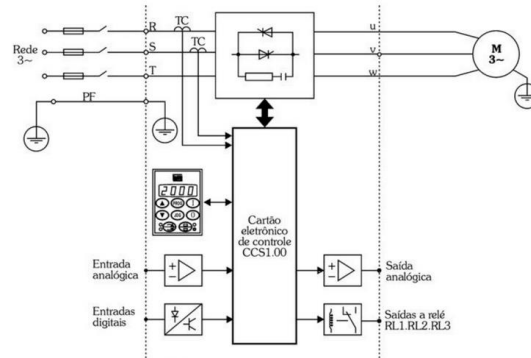
Outro equipamento de partida eletrônica é a *Soft-Starter* (Figura 10), são constituídas de um circuito eletrônico acoplado a um microprocessador que controla um conjunto de tiristores que ajusta a tensão que é aplicada nos terminais do motor (Figura 11). Essa chave de partida eletrônica tem diversos ajustes acessíveis. Pode-se controlar o torque do motor e a corrente de partida desejado em função da carga aplicada no eixo (MAMEDE, 2017).

Figura 10 - Soft-Starter



Fonte: Weg (2019)

Figura 11 - Diagrama de blocos de uma soft-starter



Fonte: Franchi (2013)

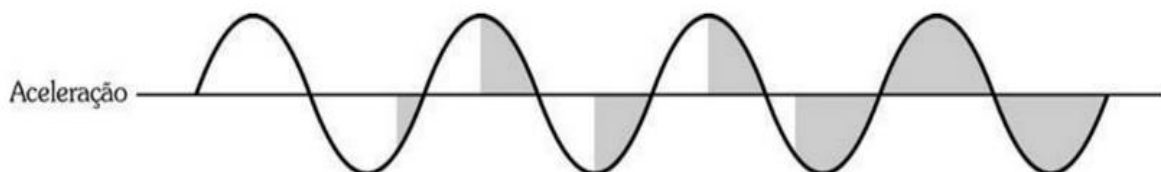
Existem diversas aplicações para *soft-starter* e dentre elas estão (MAMEDE, 2017):

- Reduzir a corrente de partida durante o acionamento dos motores elétricos, consequentemente reduzindo a queda de tensão no sistema de alimentação;
- Aceleração e Desaceleração em rampa do motor com objetivo de proteger as pessoas e produtos. Empregadas, respectivamente, nos casos de escadas rolantes e esteiras de engarramento;
- Limitação do conjugado do motor com o objetivo de reduzir a sobrecarga das máquinas, aumentando sua vida útil;
- Possibilidade de acionamento de vários motores a partir de uma única chave.

A economia de energia elétrica proporcionada pela *soft-starter* se dá quando o motor possui muitos acionamentos em um dia reduzindo assim os picos de corrente durante cada partida (FRANCHI, 2013).

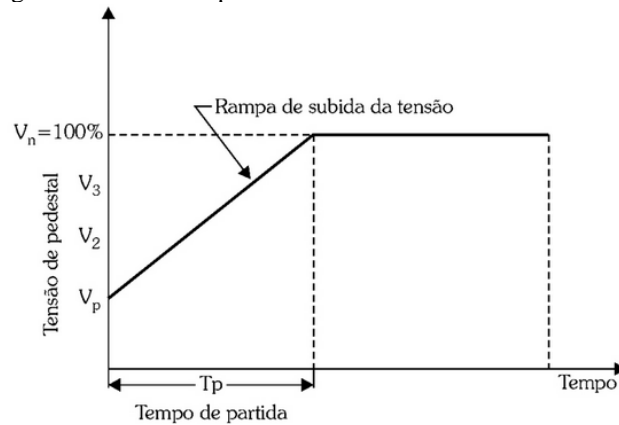
Inicialmente é inserido uma tensão capaz de vencer o torque inicial necessário pela máquina, até que o valor de tensão nominal seja estabilizado conforme regulado na *soft-starter* (Figura 12), gerando assim uma partida suave representada na Figura 13 (FRANCHI, 2013).

Figura 12 - Tensão aplicada na partida



Fonte: Franchi (2013)

Figura 13 - Curva de partida suavizada com soft-starter



Fonte: Franchi (2013).

2.8 Automação

Para Silveira e Santos (1998) automação industrial é inserida sempre que novas técnicas de controle são introduzidas em um processo. Podendo trazer maior produtividade, aumento da qualidade de um produto, aumento de poder aquisitivo da empresa e a melhor utilização da energia elétrica.

Segundo Franchi (2011), a automação e o controle de processos industriais, assegura uma redução em custos e manutenções além de aumentar a produtividade. Para que as melhorias aconteçam é necessário ter um bom controle, levando em consideração qualquer variação no processo. Diversos fatores contribuem para uma operação correta (Figura 14).

Figura 14 - Conjunto de elementos de uma malha de controle



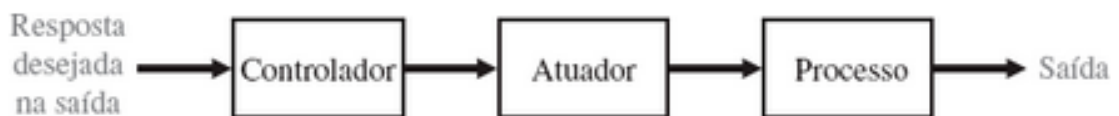
Fonte: Franchi (2011)

Para realizar a malha de controle é necessário subir os três primeiros níveis da pirâmide. Na instrumentação são definidos os sensores para realimentação e atuadores, após definido é necessário selecionar um controlador que tenha sintonia com os demais componentes (FRANCHI, 2013).

Existem dois tipos de controles básicos:

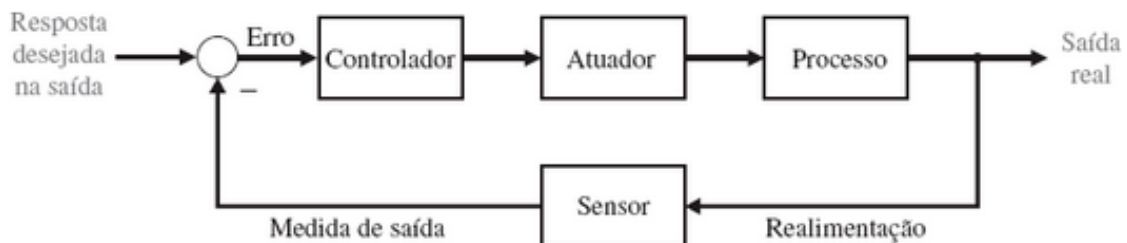
- malha aberta que não necessita saber a saída apenas que na entrada do sistema seja inserido o valor desejado (Figura 15) (SILVEIRA; SANTOS, 1998);
- sistema em malha fechada possui uma realimentação para fazer o ajuste do valor na saída conforme Figura 16 (SILVEIRA; SANTOS, 1998).

Figura 15 - Controle em malha aberta



Fonte: Dorf e Bishop 2018

Figura 16 - Controle em malha fechada



Fonte: Dorf e Bishop 2018

Sistemas em malha aberta são utilizados quando a saída já é pré-determinada e não necessita que seja realizada uma conferência do sinal no final do sistema. Por outro lado, em controles em que a saída pode ter variações é necessário fazer uma realimentação para correção do valor (DORF; BISHOP, 2018).

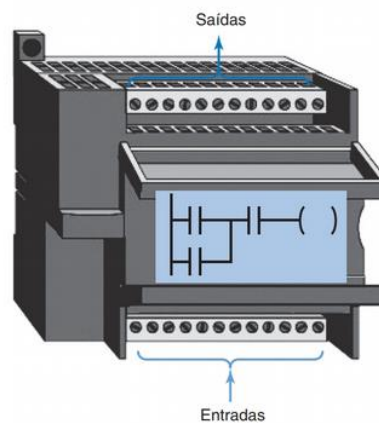
2.9 Controladores Lógicos Programáveis

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) são uma tecnologia muito utilizada em automações industriais (Figura 17). Essa plataforma de controle é um computador industrial

que pode ser programado para executar as funções de controle. Esse tipo de controle reduziu muito os circuitos convencionais que utilizam relés (PETRUZELLA, 2014).




Essa plataforma realiza o controle a partir do que o usuário programa, a programação do controlador é feita por um computador, a linguagem predominante para a programação de CLP's é o *Ladder*, conforme a Figura 18.

Figura 17 - Estrutura do CLP



Fonte: Petruzella (2014)

Figura 18 - Elementos básicos em Ladder

Nomeclatura	Abreviação	Símbolo
Contato Normalmente Aberto	NA	
Contato Normalmente Fechado	NF	
Bobina ou Saída	---	

Fonte: Silva (2007)

Para Petruzella (2014), o CLP trata-se de um computador digital para uso de controle de máquinas, projetado para funcionar em ambientes industriais, equipado com entradas e saídas, com o objetivo de substituir os relés em instalações de grande porte e também permitir ao usuário ter o controle total sobre a programação do que irá acontecer.

Segundo Capelli (2013), CLP é um dos mais importantes avanços que compõe a automação industrial. Os controladores foram elaborados para atender exigências como facilidade de programação com vida útil longa em ambientes agressivos.

Existem diversas aplicações para os CLPs em processos industriais que geram um impacto positivo. Esse tipo de computador pode ser empregado sempre que é necessário tornar um sistema mais eficiente e inteligente, já que, pode controlar uma grande quantidade de variáveis com precisão (NATALE, 2008).

Moreira (2006) utiliza o controle em malha aberta para fazer a atuação sobre um motor de indução visando eficiência energética, variando a velocidade conforme a necessidade do sistema. Para isso necessitou de um controle escalar que é realizado por meio de um inversor de frequência, e um CLP para fazer a parte lógica do sistema.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordados os procedimentos metodológicos do estudo, especificadamente, a situação energética atual da empresa e de como será realizado o projeto para a melhor utilização da energia elétrica no sistema de pressurização da injetora. Bem como as considerações definidas para simulações e desenvolvimento de análises quantitativas para verificação de consumo energético.

3.1 Produção de Injetados

Na produção de injetados são realizados diversos processos em uma só máquina, a injetora, como mencionado no capítulo anterior. O sistema de acionamento existente na empresa é uma partida estrela-triângulo (Figura 19), o que acarreta um grande consumo energético.

Figura 19 - Sistema de acionamento atual



Fonte: O autor

Para a produção atual não existe qualquer automação no equipamento que vise a eficiência energética no processo de pressurização. Para realizar o projeto visando eficiência energética, faz-se necessário saber quando a máquina necessita de pressurização. O

equipamento atual é comandado por um CLP (Figura 20) e este envia sinais lógicos quando necessário pressurizar o pistão da injetora.

Para saber quais saídas do CLP enviam os sinais no processo de pressurização, é necessário com um multímetro na função de contato analisar cada uma das saídas do controlador, para que assim, seja possível interligar o inversor de frequência no processo.

Figura 20 - Controlador atual



Fonte: O autor

A bomba de óleo que pressuriza a máquina é de grande porte, conforme os dados da Figura 21. Tendo como os principais pontos a ser levado em consideração a potência em kW (22) a tensão em V (380), corrente nominal em A (44).

Figura 21 - Dados do motor atual

FABRICANTE					
3~					
Motor Indução-Gaiola		Hz 60	CAT N		
kW(Hp-CV) 22(30)		RPM min 1755			
FS 1.15	ISOL B	Ip/In 8.3	IP55		
220/380 V		75.5/43.5 A			

Fonte: O autor

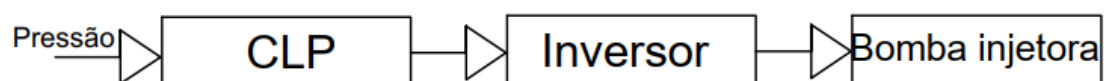
3.2 Cuidados para Automação

Para projetar a automação visando eficiência energética é necessário que os equipamentos consumam o mínimo de energia possível durante a maior parte do tempo, porém o processo atual da máquina não deve ser alterado. Para isso, é necessário escolher equipamentos que atendam às necessidades da produção.

Como mostrado no capítulo 2 a pressão para injeção de uma peça leva menos de um terço do tempo total do processo e necessita de uma resposta rápida quando solicitado pelo sistema. Logo para atender os padrões da produção o inversor de frequência necessita uma rampa de 10Hz até 60Hz em 1 segundo.

Para realizar este processo é possível utilizar o modelo de controle em malha aberta, conforme Figura 22, que possibilitará ao sistema ter a pressão quando necessário.

Figura 22 - Malha de controle projetada



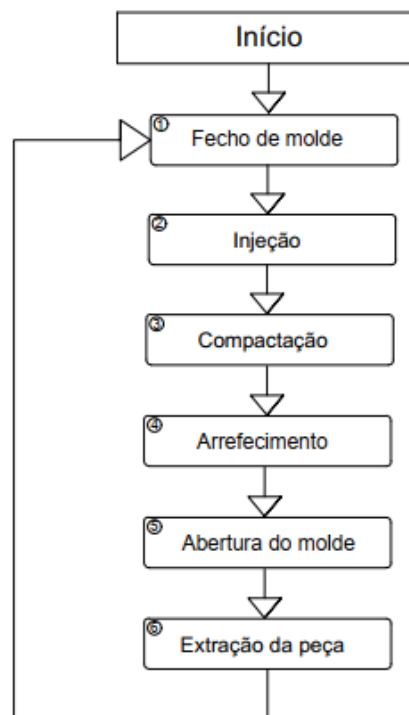
Fonte: O autor

A variável a ser controlada neste sistema é a pressão. Por outro lado, o CLP atua como o controlador e faz a definição de quando é necessária pressão no sistema. Quando detectado a necessidade de pressão, o CLP envia um sinal para o inversor que é o atuador do processo fazendo a bomba aumentar a velocidade para que a pressão do sistema seja elevada até que o molde seja preenchido.

Seguindo o modelo de Thumman e Young (2008), com uma automação visando a eficiência energética, a bomba que pressuriza o óleo somente deve ser acionada quando necessário pressão.

Com as necessidades para redução de consumo energético nesta máquina e o fluxograma de funcionamento do equipamento mostrado na figura 23, é possível iniciar a parte de simulação da automação.

Figura 23 - Fluxograma do funcionamento da máquina



Fonte: O autor

3.3 Simulações

Com os dados do sistema adquiridos, foi possível fazer a simulação do projeto, para isso utilizou-se o software gratuito CAde SIMU 3.0, que contempla chaveamentos temporizados, controladores lógicos programáveis com interface para programação, inversores de frequências e motores.

O *software* não possui os mesmos componentes que existem na prática, porém os existentes geram as mesmas respostas, suficientes para visualizar como a troca do sistema de partida direta sem controle, por um inversor de frequência.

O inversor foi configurado na velocidade de 1500rpm para 60Hz tendo como frequência mínima definida em 10Hz, as velocidades serão predefinidas conforme a Figura 24, a rampa de aceleração necessita ser rápida então foi definido uma rampa de 1 segundo para aceleração e 2 segundos para desaceleração, em vista da proteção dos componentes do inversor foi adicionado uma injeção de tensão por 2 segundos na parada do motor.

Figura 24 - Velocidades pré-definidas do inversor

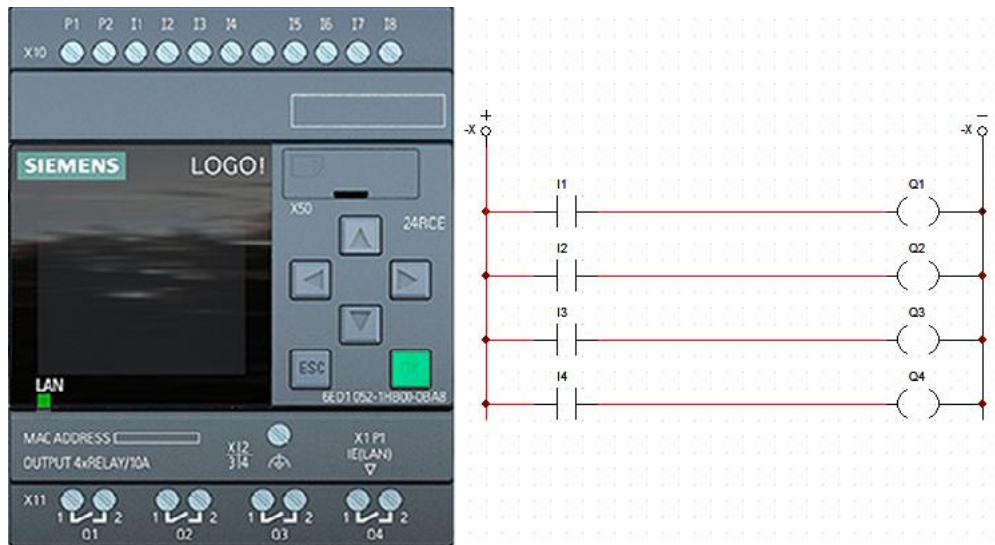
Velocidade pré selecionada	
1ª Velocidade pré definida Conjunto de valores	
2ª Velocidade pré definida	10
3ª Velocidade pré definida	60
4ª Velocidade pré definida	0

Fonte: O autor

Para realizar a simulação foi necessário fazer uma programação em *Ladder* que representa as entradas e saídas do controlador atual Figura 25, pois o CLP da máquina indica quando o sistema está no processo de pressurização. O programa funciona da seguinte forma:

- Entrada I1: Habita a saída Q1 que aciona o inversor;
- Entrada I3: Quando o sistema não necessita pressão habilita a saída Q3 que eleva a velocidade do motor para 10Hz;
- Entrada I4: Quando o sistema requer tensão habilita a saída Q4 que eleva a velocidade do motor para 60Hz.

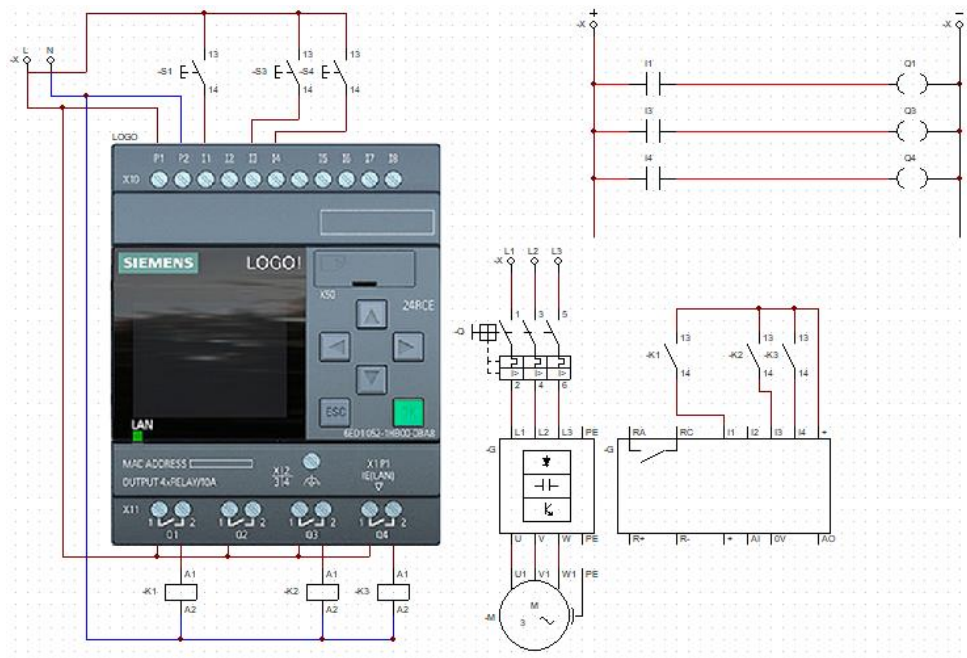
Figura 25 - Programação em Ladder do CLP



Fonte: O autor

Após parametrizado o inversor de frequência, e programado o controlador, foi necessário fazer a comunicação entre os dois equipamentos (Figura 26). Para questão de simulação foi necessário utilizar botoeiras para simular as entradas do CLP e contadoras nas saídas.

Figura 26 - Comunicação entre CLP e Inversor



Fonte: O autor

3.4 Prototipagem

Para comprovação da eficiência do sistema proposto, foi montado em bancada um sistema que recria o funcionamento da injetora. Utilizando os materiais disponíveis no laboratório foi possível medir e avaliar o sistema de melhoria proposto.

A montagem do sistema foi realizada conforme projeto mostrado na figura 26, onde o sistema é acionado por um inversor de frequência e controlado por um controlador lógico programável. Para a prototipagem ficar coerente foi necessário inserir uma carga, neste caso, um freio de Foucault.

3.4.1 Especificação de materiais

Na prototipagem a alimentação foi feita por uma fonte de tensão ajustável, regulada na tensão de 380 V entre fases e 220 V entre fase e neutro, com sistema de aterramento para proteção dos dispositivos eletrônicos que por ela serão alimentados.

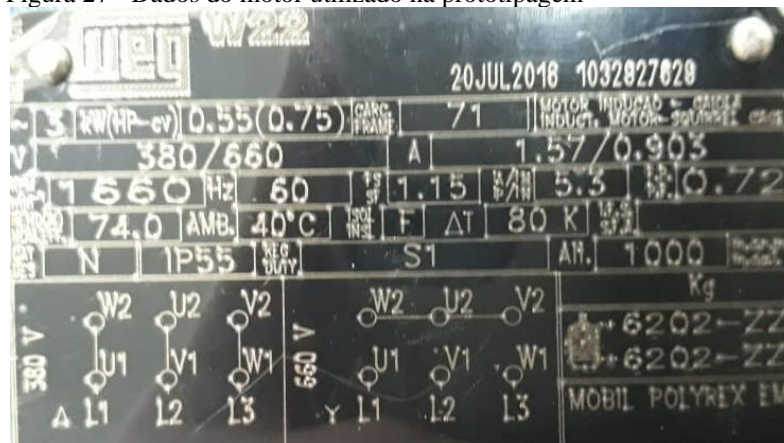
O controlador lógico programável utilizado foi o CLW-02/20HR-D, com alimentação de 220 V e saídas de 24 Vcc, com programação em *ladder* possuindo a função de timer para realizar o acionamento da carga na forma cíclica, bem como é realizado na máquina onde é feito o estudo.

O sistema de prototipagem ainda possui uma contatora que com corrente nominal de 20 A, com um contato auxiliar normalmente aberto, utilizada para comandar a carga que é acionada pelo CLP.

A carga será aplicada pelo freio de Foucault. O controle da carga deverá ser ajustado de modo a não ultrapassar a potência máxima do motor utilizado na prototipagem.

O motor utilizado tem características elétricas inferiores ao existente na empresa. Os dados do motor podem ser identificados na Figura 27, frisando os itens mais importantes que são a corrente máxima de 1,57A e a tensão ligada em delta(triângulo) de 380V entre fases.

Figura 27 - Dados do motor utilizado na prototipagem



Fonte: O autor

O inversor que realiza a variação da frequência do motor é o CFW11 para com tensão nominal de 380V. As principais características do equipamento estão apresentadas na figura 28.

Figura 28 - Dados do inversor de frequência utilizado na prototipagem



The label for the WEG Frequency Inverter CFW11 includes the following information:

- WEG** logo
- FREQUENCY INVERTER CFW11**
- QR code
- MOD.: BRCFW110003T4SZ
- MAT.: 10234055 MAX. TA: 50°C(122°F)
- OP.: 1113076453 SERIAL#: 1045436778
- PESO/WEIGHT: 5,7kg (12,6lb) 37 0

	LINE LINEA REDE	OUTPUT SALIDA SAÍDA
VAC	380 – 480V / 3 ~ 3,6A	0 – REDE 3 ~
A (ND) 60s/3s	3,6A	3,6A 3,96A / 5,4A
A (HD) 60s/3s	3,5A	3,5A 5,25A / 7,2A
Hz	50/60Hz	0 – 300Hz

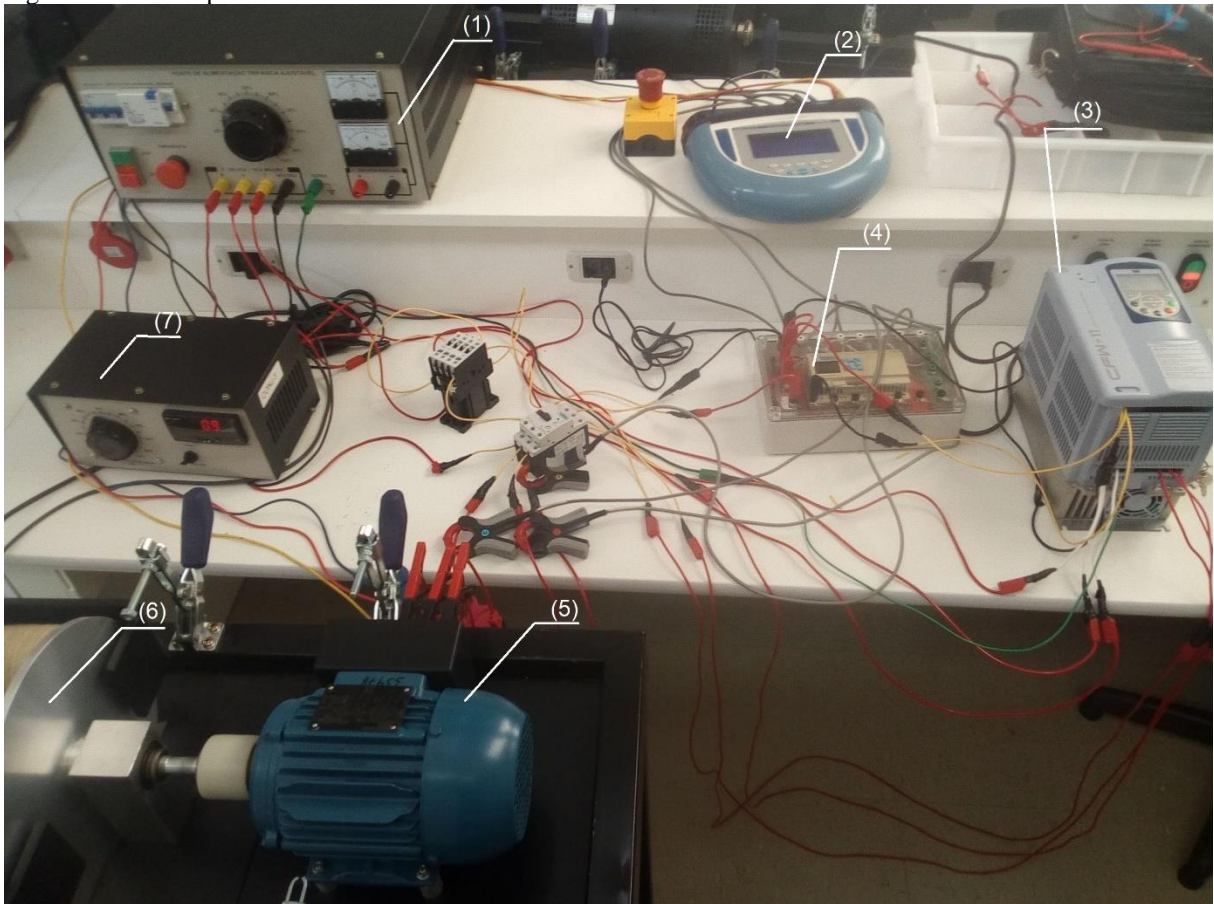
Fonte: O autor

A Figura 29 apresenta o protótipo onde (1) é a fonte de tensão (2) analisador de energia (3) Inversor de frequência (4) CLP (5) Motor (6) freio de Foucault (7) controlador de carga.

Quando o sistema existente da injetora está realizando o processo de pressurização, as válvulas de alívio são fechadas, gerando carga no eixo do motor. No protótipo sem automação o CLP acionará um freio de Foucault para simular a carga no eixo. Durante o restante do processo as válvulas de alívio abrem e o motor fica sem carga. No protótipo o CLP inativa o freio de Foucault, removendo a carga do eixo.

No protótipo com o uso do inversor de frequência, no instante que o freio de Foucault for acionado, a função *multi-speed* do inversor de frequência é ajustada para trabalhar em 60 Hz. Quando o CLP inativa o freio de Foucault, automaticamente a função de *multi-speed* é ajustada para 30 Hz reduzindo assim o consumo de energia elétrica.

Figura 29 – Protótipo montado em bancada



Fonte: O autor

3.5 Análise de consumo

Para fazer a análise do consumo da máquina foi utilizado o analisador de energia da RE6000 (Figura 30), disponível na universidade para fins de trabalhos relacionados a qualidade de energia e eficiência energética.

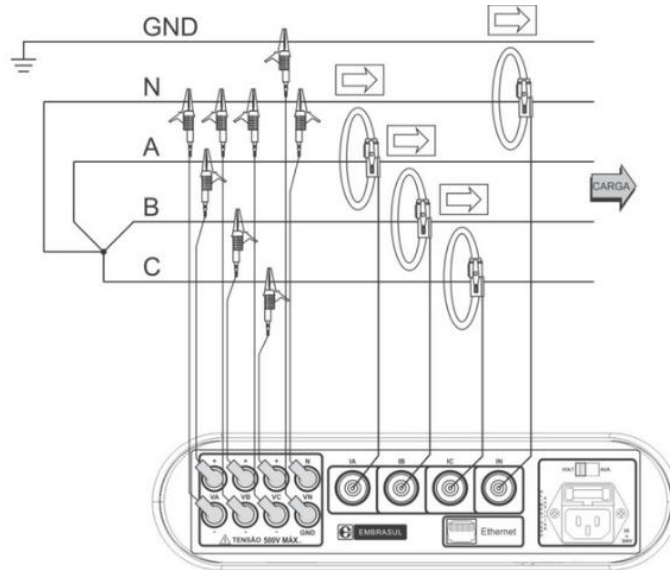
Figura 30 - Analisador de energia



Fonte: EMBRASUL

Para medição dos valores do consumo da carga selecionada é necessário fazer a ligação do analisador de energia conforme a Figura 31. Essa configuração permite fazer a leitura das correntes, tensões e potências em todas as fases da máquina.

Figura 31 - Esquema de ligação do analisador



Fonte: EMBRASUL

O analisador possui diversos intervalos de tempos para realizar uma leitura, como o equipamento provoca picos de energia para realizar o processo, foi selecionado para que a leitura ocorresse a cada um segundo, porém a memória do equipamento é limitada, conforme mostra a Figura 32. O tempo máximo de leitura é de 8 horas e 40 minutos, suficiente para registrar um dia de produção.

Figura 32 - Relação de autonomia para gravação de dados

Período	Dias	Horas	Minutos	Harmônicas	Transientes ABC
100ms		03	16	1 por registro	Selecionados
200ms		06	32	1 por registro	Selecionados
500ms		16	20	1 por registro	Selecionados
01s	1	08	40	1 por registro	Selecionados
02s	2	17	19	1 por registro	Selecionados
03s	4	02	02	1 por registro	Selecionados
04s	5	10	43	1 por registro	Selecionados

Fonte: EMBRASUL

3.6 Cálculo de retorno

O cálculo de retorno financeiro do sistema é elaborado via *software*. Neste trabalho foi utilizado o Excel como ferramenta, utilizando-se de tabelas e gráficos para melhor visualização do investimento.

Utilizando de técnicas estudadas na matéria de engenharia econômica, foi elaborada uma planilha onde é realizado o abatimento dos custos necessários para a implementação do sistema em comparação à redução dos gastos com energia elétrica pela empresa.

A Figura 33 mostra a planilha utilizada para cálculo de redução do consumo, o retorno do investimento se dá quando os valores da coluna retorno tornam-se positivos.

Figura 33 - Planilha para cálculo de retorno do investimento

Cálculo de retorno do investimento inicial de R\$ 11.000,00		
Mês	Redução (R\$)	Retorno (R\$)
1º	384,30	-11.000,00
2º	384,30	-10.615,70
3º	384,30	-10.231,40
4º	384,30	-9.847,10
5º	384,30	-9.462,80
6º	384,30	-9.078,50
.		
.		
30º	384,3	144,70

Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio de simulações, prototipagem e análises realizadas na planta da empresa.

4.1 Projeto

O projeto final simulado no CADe SIMU 3.0 apresentado na Figura 26, convergiu para o resultado desejado variando a frequência de 10 a 60 Hz, fazendo o controle da velocidade do motor Tabela 1, reduzindo também a sua potência e acionando somente quando necessário.

Tabela 1 - Relação de condições e frequência do inversor

Condição	Frequência
<i>Stand By</i>	10Hz
Pressurização	60Hz

Fonte: O autor

Conforme mostrado no capítulo 2, o inversor para aplicação neste caso é de controle escalar que tem como característica principal a variação de velocidade variando a tensão, e assim então reduzindo o torque e a potência do equipamento quando não necessário esforço mecânico.

A tabela 2 mostra a relação da variação frequência com a velocidade do motor e a tensão do estudo realizado:

Tabela 2 - Relação do gráfico escalar do projeto

Frequência (Hz)	Velocidade (rpm)	Tensão (V)
10	291,6	63,3
60	1750	380

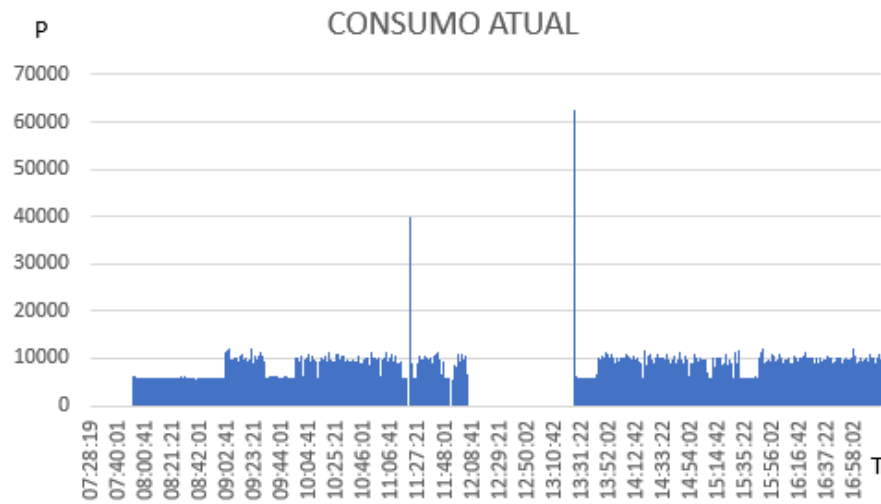
Fonte: O autor

4.2 Análise de redução de consumo energético utilizando inversor

O equipamento foco de estudo foi submetido a um dia de verificação do analisador de energia para fazer a análise do consumo atual e para apontar desperdícios de energia elétrica durante o processo produtivo.

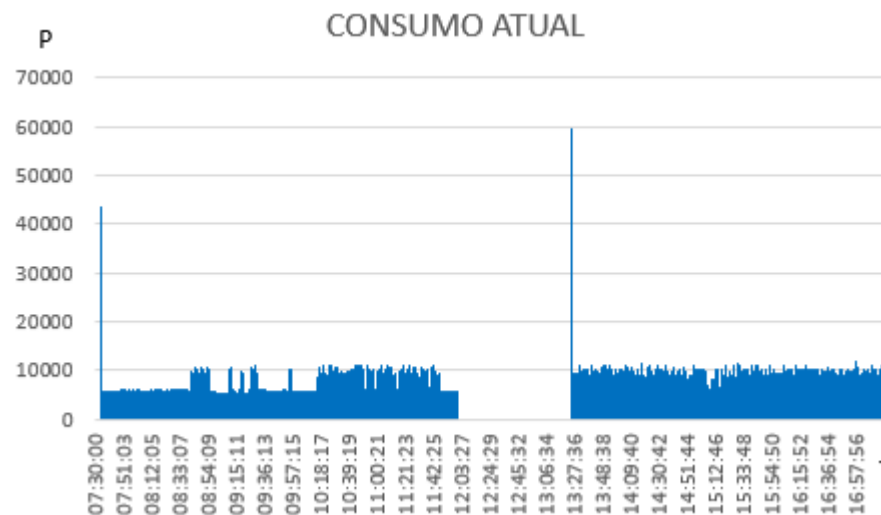
Com um registro a cada 1 segundo foi possível analisar o consumo de energia durante 8 horas e 40 minutos contemplando um dia de produção que está representado na Figura 34 e na Figura 34. Os gráficos mostram que o consumo da máquina, mesmo em *stand by*, é alto, além dos pontos onde a máquina é acionada e possui picos elevados de consumo energético.

Figura 34 - Consumo atual do motor em W (data: 04/06/2019)



Fonte: O autor

Figura 35 - Consumo atual do motor em W (data:30/10/2019)

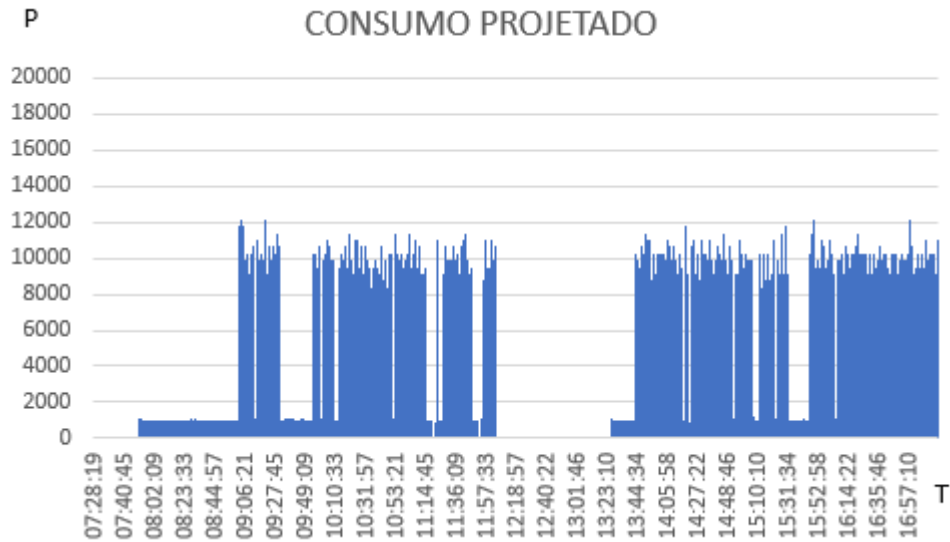


Fonte: O autor

A diferença no consumo total das análises foi menor que 1%. Por esse motivo o gráfico da Figura 33 foi utilizado como padrão para o cálculo de redução mensal.

Após gerado o consumo real atual durante um dia de produção foi possível fazer uma simulação para verificação da redução do consumo energético mensal, aplicando a redução de tensão nos momentos onde o sistema está em *stand by* tem-se o resultado da redução do consumo representado na Figura 36.

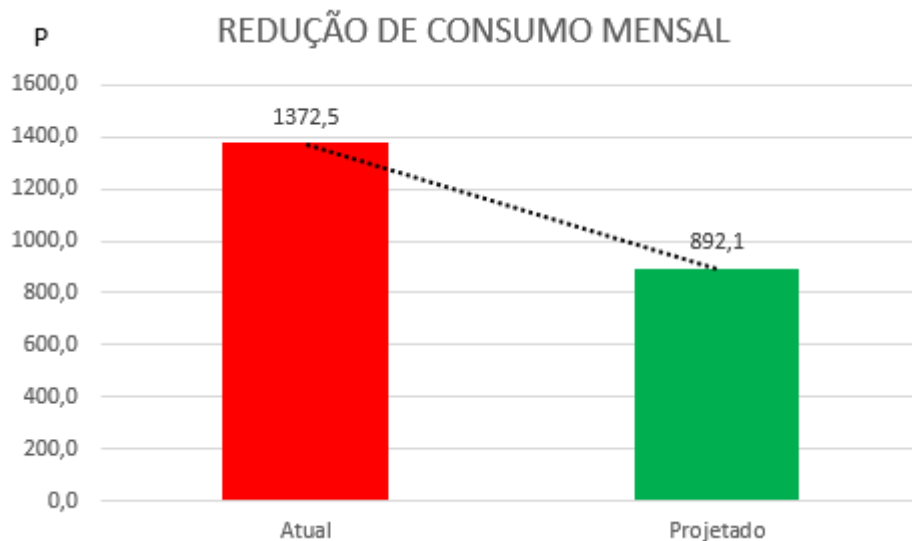
Figura 36 - Consumo projetado em Watts



Fonte: O autor

Com o gráfico de projeção, a redução fica evidente nos momentos onde o equipamento fica operando as funções de arrefecimento, extração e injeção do material. Para facilitar a visualização da redução foi elaborado uma comparação que é representada na Figura 37.

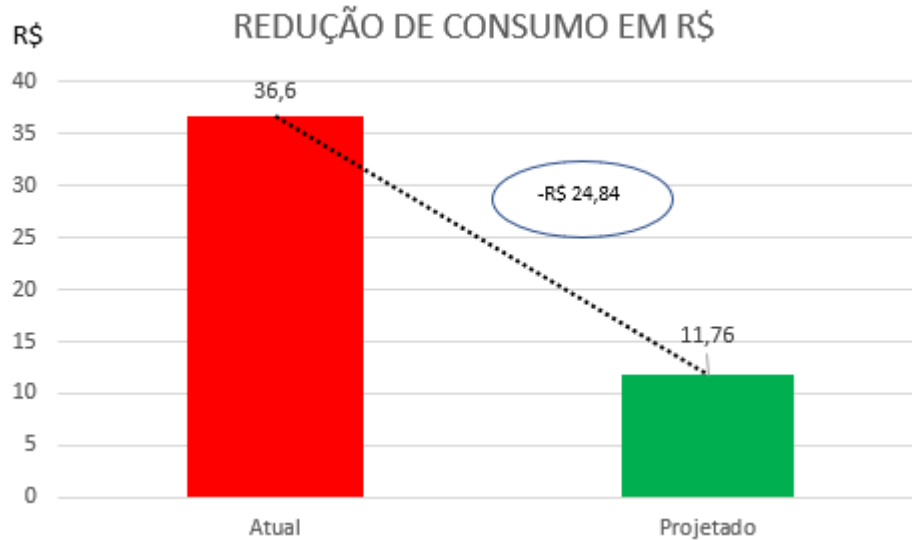
Figura 37 - Redução de consumo diário em Quilowatts



Fonte: O autor

O sistema projetado utilizando o inversor variando de 10 à 60 Hz traz uma queda de consumo diária de aproximadamente 67%. Representando uma redução de R\$ 24,84 mensais representado na Figura 38.

Figura 38 - Redução do consumo diário em reais

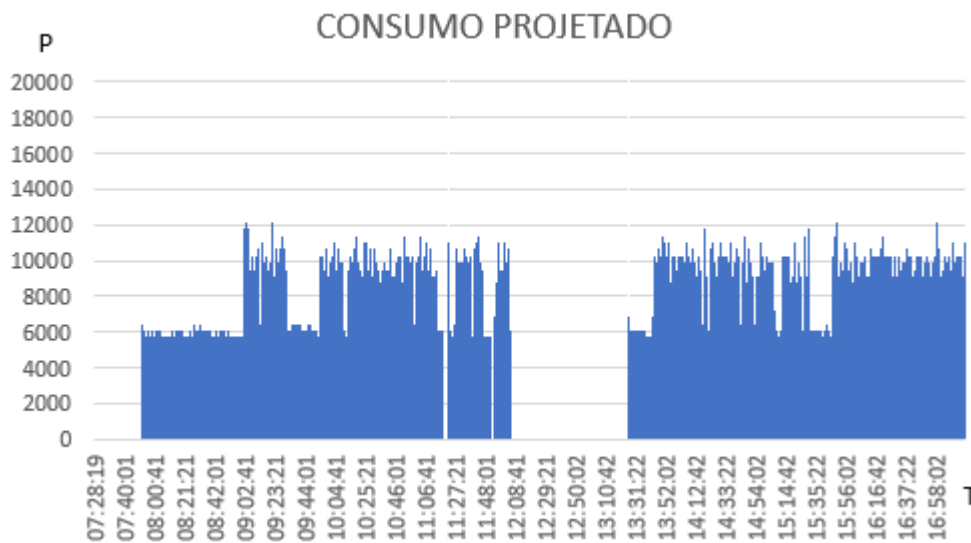


Fonte: O autor

4.3 Redução de consumo utilizando *Soft-starter*

Conforme explanado no capítulo dois, a *soft-starter* atua em partidas, suavizando a aceleração, e em paradas, suavizando a desaceleração. Essa redução no caso do acionamento existente é apresentada na Figura 39.

Figura 39 - Consumo projetado em W



Fonte: O autor

Comparando o consumo projetado com *soft-starter* e inversor de frequência fica evidente a eficácia do modelo proposto com o inversor, já que ele pode atuar em variações de frequência rápida reduzindo o consumo durante todo o processo de injeção.

Com o resultado obtido da comparação dos consumos projetados, optou-se pela realização da prototipagem do sistema com o inversor de frequência para comprovar a redução alcançada.

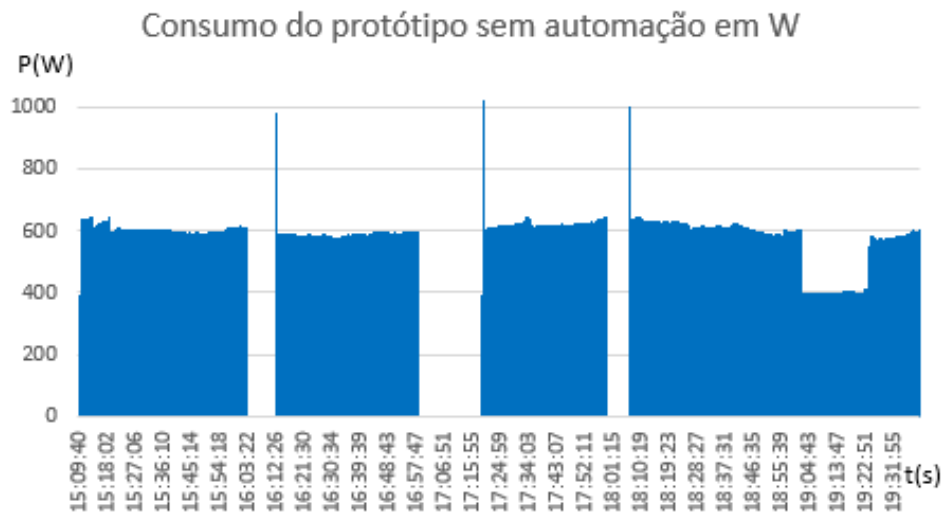
4.4 Resultados da prototipagem

O protótipo foi submetido a medições, com o objetivo de validar os resultados obtidos no projeto. A análise foi realizada tal qual na empresa, realizando a leitura do sistema a cada 1 segundo.

4.4.1 Sistema sem automação

O acionamento sem automação apresentou um resultado próximo do observado na empresa, mantendo um consumo elevado mesmo sem carga no eixo, além dos picos de potência gerado nas partidas representados na Figura 40.

Figura 40 - Consumo do protótipo sem automação em Watts

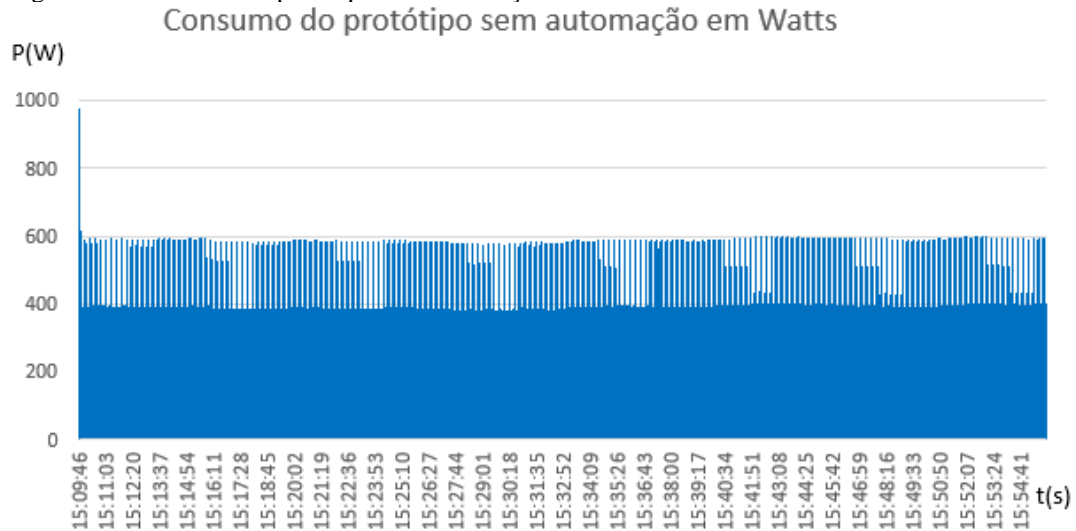


Fonte: O autor

A prototipagem foi baseada no funcionamento atual do equipamento. No intervalo de tempo de 15:09 até 15:55 a máquina trabalha sem nenhuma interrupção. Em seguida a máquina executa uma parada e retorna ao funcionamento. No intervalo de tempo de 19:01 até 19:21 a

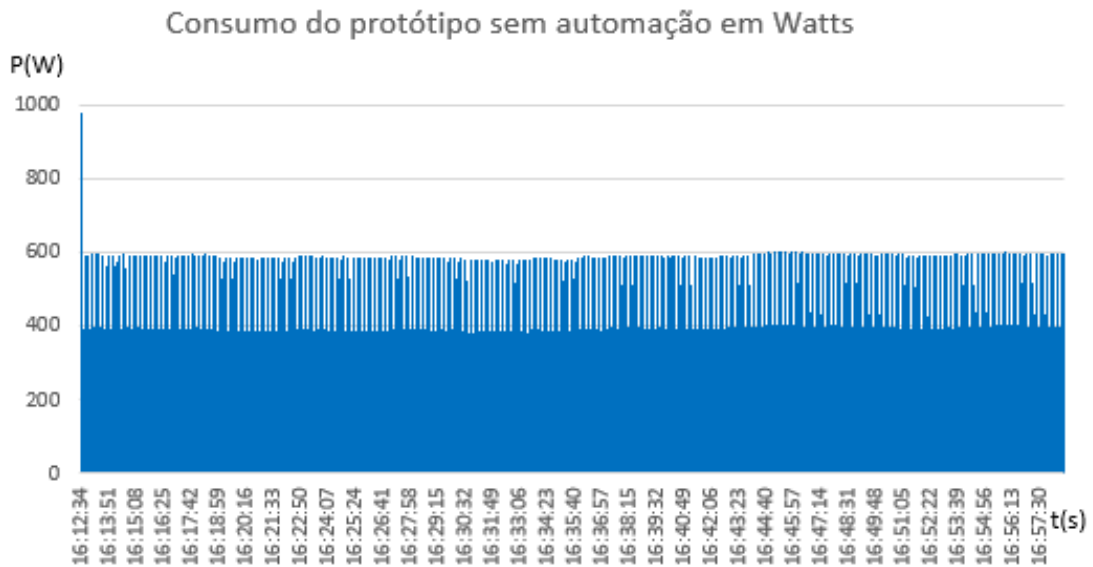
máquina fica num longo período em *stand-by*. Para a melhor visualização do consumo foram elaborados os gráficos que representam os intervalos de tempo separadamente de 15:09 até 16:01 (Figura 41), de 16:12 até 16:57 (Figura 42), de 17:20 até 17:59 (Figura 43) e de 18:10 até 19:31 (Figura 44).

Figura 41 - Consumo do protótipo sem automação de 15:09h até 16:01h



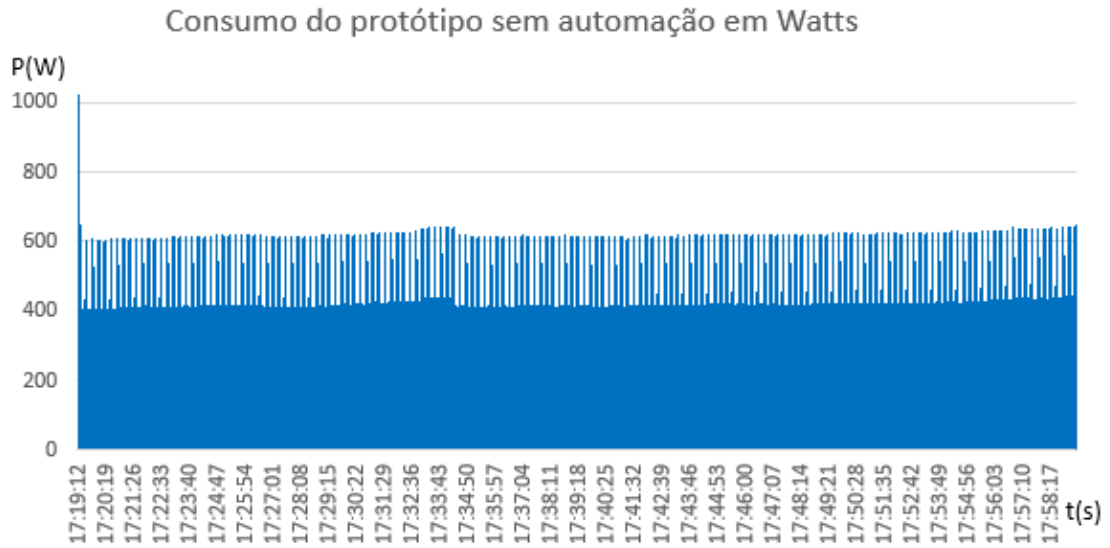
Fonte: O autor

Figura 42 – Consumo do protótipo sem automação de 16:12h até 16:57h



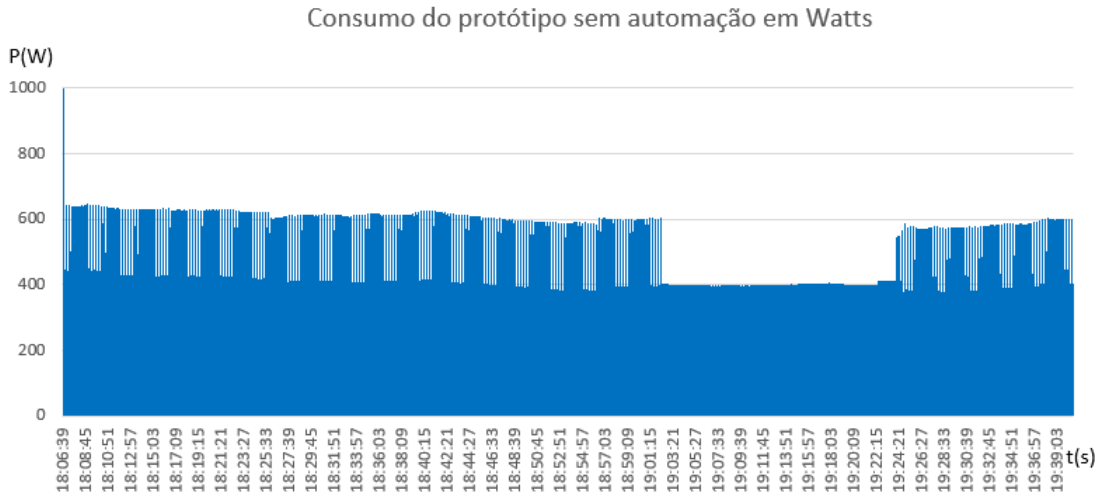
Fonte: O autor

Figura 43 - Consumo do protótipo sem automação de 15:19h até 17:58h



Fonte: O autor

Figura 44 - consumo do protótipo sem automação de 18:09h até 19:53h

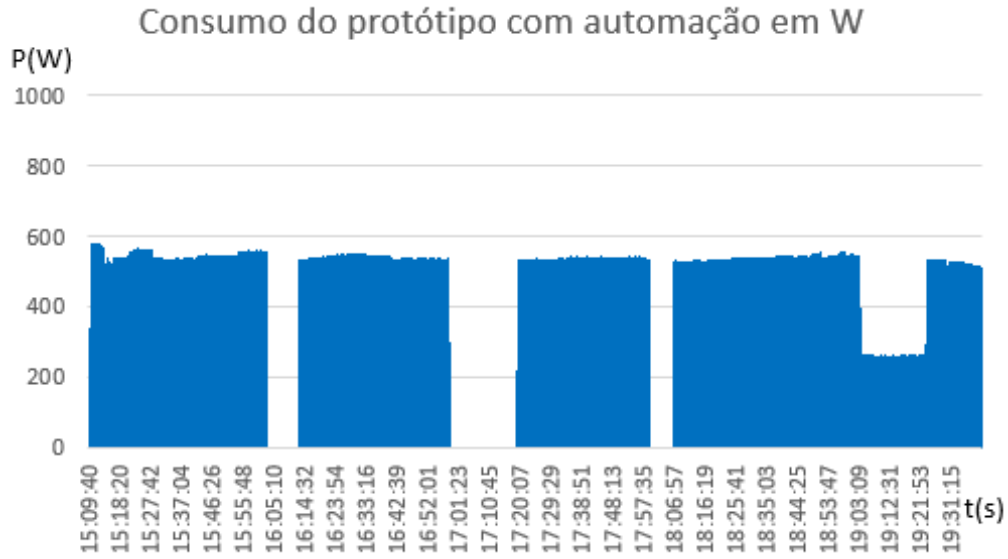


Fonte: O autor

4.4.2 Sistema com automação

Após realização da análise do consumo da máquina sem automação, foi inserido o inversor de frequência. O sistema com automação demonstrou um menor consumo (Figura 45) no momento em que fica em *stand-by* quando comparado ao sistema atual.

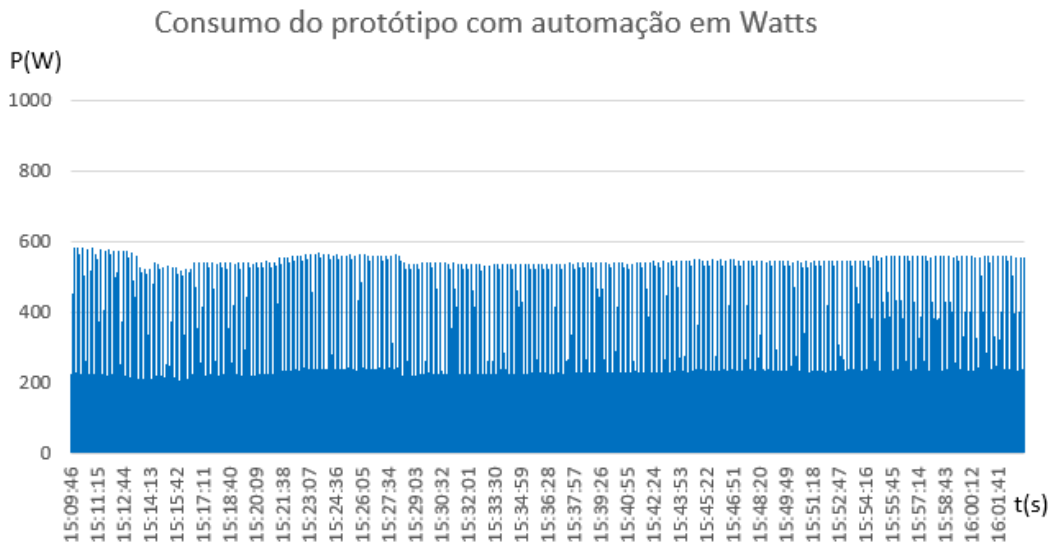
Figura 45 - Consumo do protótipo com automação em Watts



Fonte: O autor

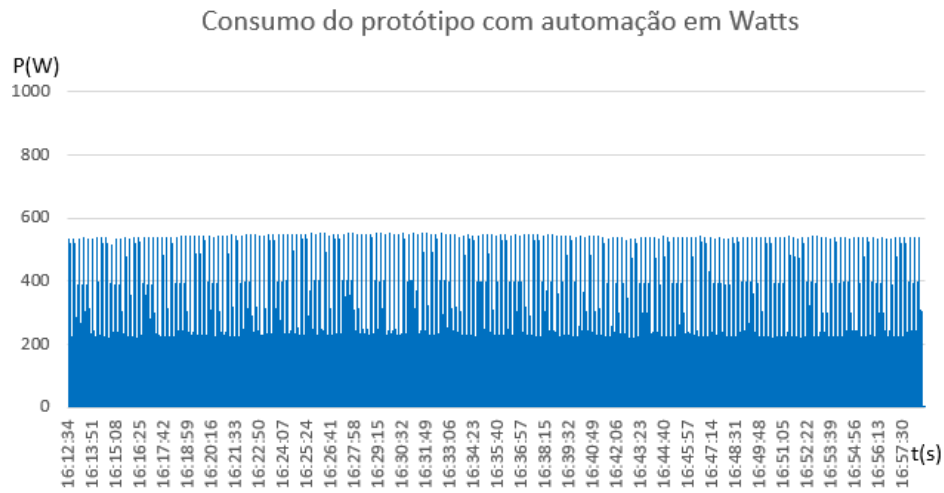
Como o sistema tem acionamento e repouso rápido, durante o período que a máquina fica em operação sem interrupções. Para a melhor visualização do consumo foram elaborados os gráficos que representam os intervalos de tempo separadamente de 15:09 até 16:01 (Figura 46), de 16:12 até 16:57 (Figura 47), de 17:20 até 17:59 (Figura 48) e de 18:10 até 19:31 (Figura 49).

Figura 46 - Consumo do protótipo com automação de 15:09h até 16:01h



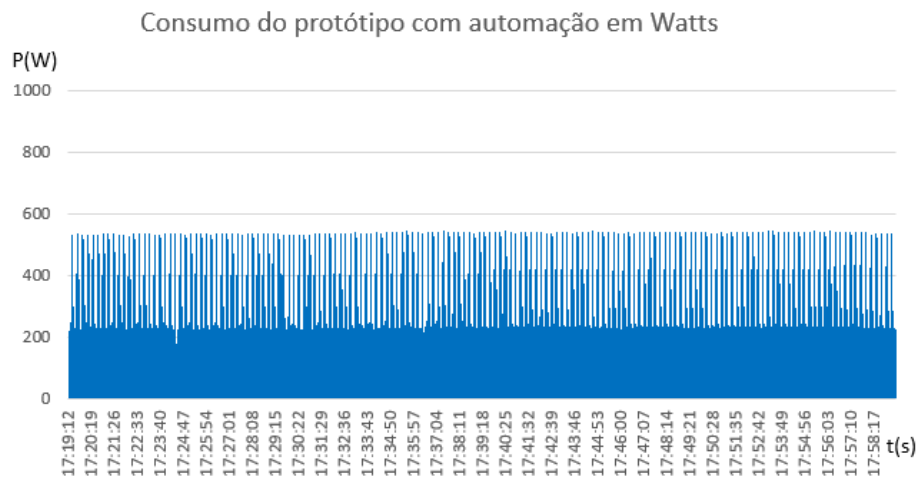
Fonte: O autor

Figura 47 - consumo do protótipo com automação de 16:12h até 16:57h



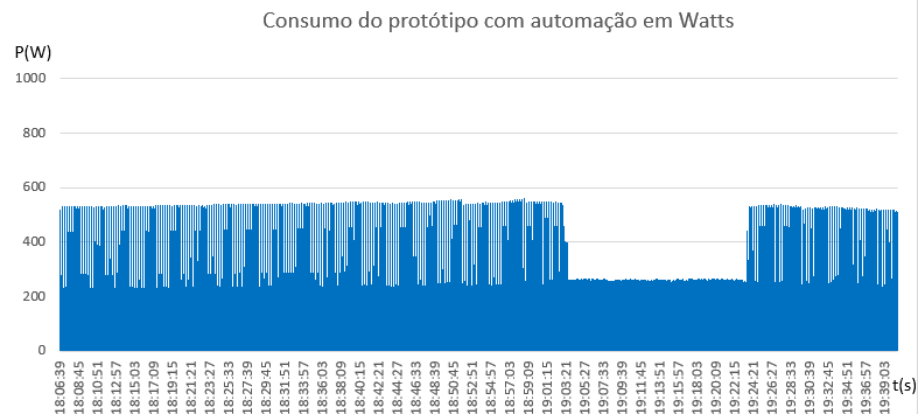
Fonte: O autor

Figura 48 - Consumo do protótipo com automação de 17:19h até 17:58h



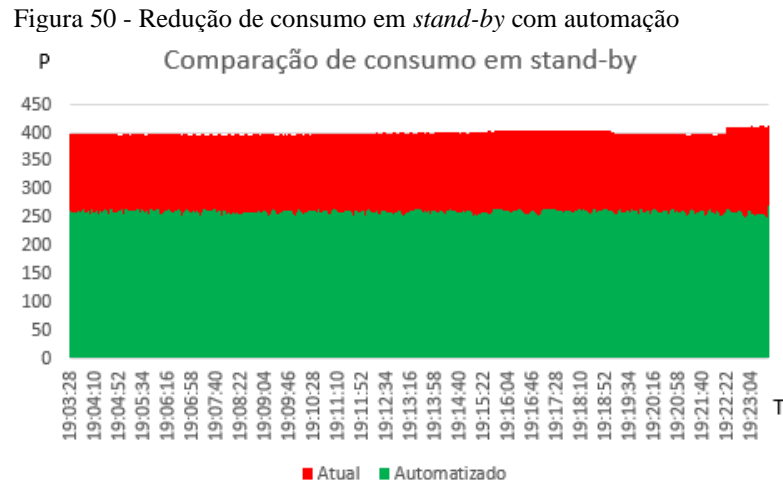
Fonte: O autor

Figura 49 - Consumo do protótipo com automação de 18:06h até 19:39h



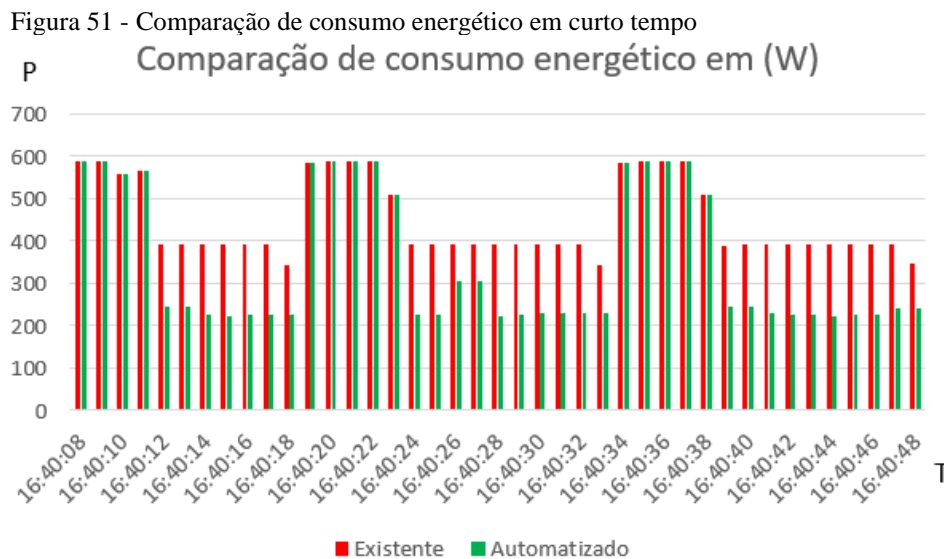
Fonte: O autor

Quando o sistema fica durante um elevado período em *stand-by* fica fácil verificar a redução proporcionada pelo inversor de frequência. Para melhor visualização da redução no momento de *stand-by* da máquina foi elaborada a Figura 50.



Fonte: O autor

Para facilitar a compreensão da redução de energia, foi gerado um gráfico de 40 segundos representado na Figura 51, onde estão apresentados os consumos da máquina sem automação e da máquina automatizada. No momento que o sistema funciona sem interrupções ele aciona o motor durante 1/3 do ciclo de injeção apenas. Isto significa que a cada ciclo de 15 segundos, 10 segundos o motor fica em *stand-by*, e nos 5 segundos restantes o motor está a plena carga.

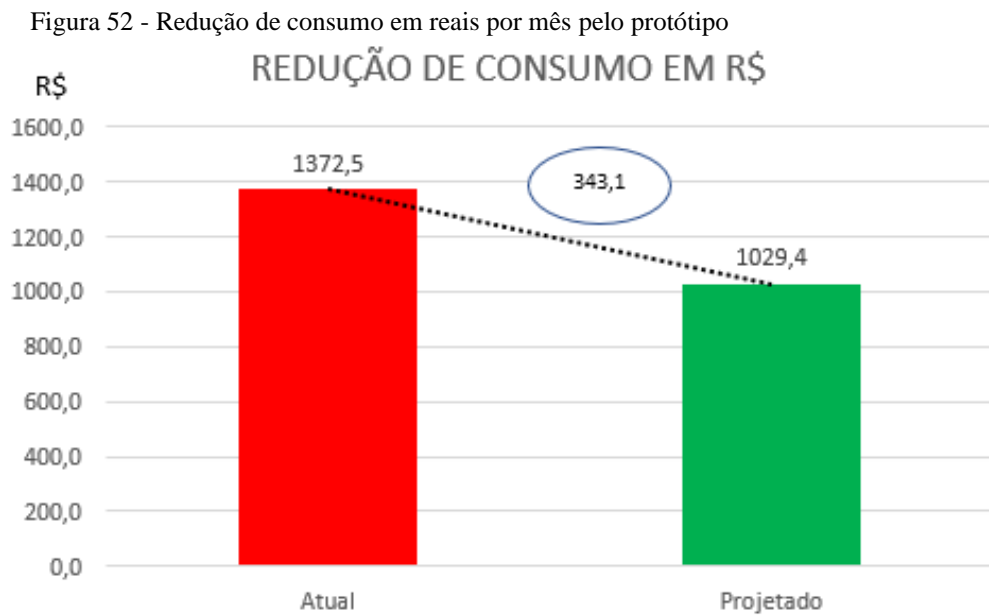


Fonte: O autor

O protótipo mostrou uma queda de consumo diária de aproximadamente 35%. A redução na eficiência com relação ao projeto se deve pela inviabilidade do sistema funcionar em 10 Hz, pois em longos períodos em *stand-by* o equipamento possui um déficit de refrigeração devido à baixa rotação. Para solucionar essa deficiência de ventilação é necessário utilizar-se de uma ventilação forçada, ou ajustar frequência em *stand-by* para 30 Hz.

O gráfico evidencia a redução do consumo quando modificado a forma de acionamento do motor para o processo além de utilizar as técnicas de controle em malha aberta em conjunto de um controlador lógico programável para fazer o ajuste da velocidade do motor.

Uma das principais vantagens dessa redução de 35% é o custo de energia pago no final de um mês que, para uma tarifa de energia que custa para a empresa R\$ 0,80 por quilowatt consumido está representado na Figura 52.



Fonte: O autor

Com a prototipagem o inversor de frequência deve ser configurado conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Relação do gráfico escalar do protótipo

Frequência	Velocidade	Tensão
(Hz)	(rpm)	(V)
30	875	190
60	1750	380

Fonte: O autor

4.5 Retorno de investimento

Para a aplicação atual o inversor dimensionado foi um WEG CFW700 trifásico tendo como as principais características 30 CV, 44 A e 380V tendo a possibilidade de atuar com 8 variações de velocidade.

Foram realizados diversos orçamentos em distribuidoras de materiais elétricos, o menor valor encontrado foi o de R\$ 11.000,00 sendo deles R\$ 10.000,00 o custo do inversor de frequência na data de 04/10/2019 e o restante do valor é para mão de obra de dois dias para instalação e configuração do sistema.

O cálculo para retorno do investimento foi baseado na redução de 35% do valor medido na máquina, isso porque o dado obtido por meio da prototipagem comprovou este valor de redução, além disso, a economia foi baseada considerando somente bandeira verde, tornando esse o pior caso. Nessas condições o retorno do investimento ficou em 2 anos e 6 meses conforme mostra a Figura 53.

Figura 53 - Retorno do investimento



Fonte: O autor

5 CONCLUSÕES

Em meio ao cenário difícil que o setor industrial brasileiro está inserido, a economia em todos os processos é de suma importância, já que os produtos têm maior valor agregado com esse cuidado. A redução de desperdício em energia está se consolidando no cenário atual de forma rápida. O trabalho fornece embasamento sobre eficiência energética, impacto do custo energético nas indústrias, além dos métodos utilizados para fazer estudos que buscam redução de consumo energético.

Trabalhos já realizados sobre eficiência energética como o de Fonseca (2015)), sendo eles referente a automação industrial ou não, apresentaram resultados próximos aos encontrados neste estudo. Além disso, diversos autores renomados como Franchi (2013) e Mamede (2017) que inserem em seus livros a automação de sistemas de acionamento estipulam valores próximos aos encontrados.

Atualmente a máquina possui um acionamento ineficiente e sem controle e automação alguma. Após realizados os fluxos do ciclo produtivo da máquina estudada, foi possível elaborar um protótipo em escala reduzida, que se comporta de forma igual à injetora de plástico. Com isso, comprovamos a redução de energia proporcionada pela automação

Atualizando o acionamento da máquina, utilizando chave eletrônica para partida e utilizando o CLP para realizar o controle, comprovamos uma redução de 35% no consumo de energia do equipamento. Esse trabalho foi elaborado de acordo com as recomendações da IEA, que sugere o uso de acionamentos com eletrônica de potência.

REFERÊNCIAS

- ARRABAÇA, A.D. **Eletrônica de potência – conversores de energia CA/CC**. 2ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2016.
- BATISTA A.D. **Um estudo de correntes induzidas em meios maciços ferromagnéticos – aplicação no projeto de freios de correntes parasitas**. Dissertação Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- CAPARROZ M.P.L.A.; IOSHII A.D. **Análise da eficiência energética de sistemas hidráulicos pela aplicação de inversor de frequência no motor elétrico de acionamento da bomba hidráulica**. Trabalho de conclusão de curso Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2014.
- CAPELLI, A. **Automação Industrial controle do movimento e processos contínuos**. 3ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- COSTA, M.H.F. **Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo: inversor de frequência x chaves de partida estática**. Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- DOMINGUES, D.F.A. **Análise e Modelação do consumo de energia no processo de injeção de plásticos**. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.
- DORF, C.R.; BISHOP H.R. **Sistemas de controle moderno**. 13ª ed. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2018.
- ELETROBRÁS **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Efic%20En%20em%20Sist%20de%20Refrig%20Ind%20e%20Com-Elektrobras-05.pdf>
- EPE **Perspectivas energéticas globais a longo prazo**. World Energy Outlook 2018, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em [http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20_%20EPE%20WEO%20launch_Clean%20\(002\).pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20_%20EPE%20WEO%20launch_Clean%20(002).pdf).
- EPE **Anuário Estatístico de energia elétrica 2018 ano base 2017. Brasil, 2018** Disponível em <http://epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>
- EPE **Projeção da demanda de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2017, disponível em [http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao245/topico261/DEA%20001_2017%20%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%2020172026_VF\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao245/topico261/DEA%20001_2017%20%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%2020172026_VF[1].pdf).
- FONSECA G.M. **Estudo comparativo de consumo energético de uma motobomba centrífuga com controle de vazão na forma tradicional e com utilização do inversor de frequência**. Trabalho de conclusão Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

- FRANCHI, M.C. **Acionamentos elétricos**. 4ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2013.
- FRANCHI, M.C. **Controle de processos industriais – Princípios e aplicações**. 1ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2011.
- KADDARI, M.; MOUDEN, M.E.; HAJJAJI, A. **Reducing energy consumption by energy management and energy audits in the pumping stations**. Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE), 2018.
- MITOLO, M.; NOUSSAN, M.; PONS, E.; PORTE, D.; TARTAGLIA, M. **Energy analysis in an italian opera house**. IEE industry applications Magazine, 2019.
- MOREIRA, B.A. **Análise da operação de sistemas de ventilação industrial visando à eficiência energética**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2006.
- NASCIMENTO, G. **Comandos elétricos – teoria e atividades**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- NATALE, F. **Automação Industrial**. 10ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2008.
- OLIVEIRA, A.L.G.; MATOS, S.A.; BLACK, D.H. **Impacto da indústria 4.0 no Sistema elétrico de distribuição de energia**. 17º Congresso Nacional de Iniciação Científica, São Paulo, 2017.
- PEREIRA B.D.B.; CONTESSI G.; ROSSETTI M.; ROSSO P.H.F.; TASSI R. **Estudo de acionamentos das chaves de partidas elétricas e eletromecânicas para motores elétricos**. 1º simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, 2012.
- PETRUZELLA, F.D. **Controladores Lógicos Programáveis**. 4ª ed. Editora AMGH, Rio de Janeiro, 2014.
- PETRUZELLA, F.D. **Motores elétricos e acionamentos**. 1ª ed. – Editora AMGH, 2013.
- PINHEIRO R.F. **Estudo de um sistema de frenagem eletromagnética empregando correntes parasitas**. Tese Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- RIBEIRO, L.S. **Evolução tecnológica e automação das máquinas injetoras**. Trabalho de conclusão de curso, Centro Paula Souza, São Paulo, 2009.
- SCHMIDT, C.A.J.; LIMA M.A. **A demanda por energia elétrica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro 2004.
- SERRENHO, T.; BERTOLDI, T.; CAHILL, C. **Survey of energy audits and energy management systems in the member states**. JRC SCIENCE, European Union, 2015.
- SILVA, E.M. **Controladores Lógicos Programáveis – LADDER**. Disponível em <<http://groupmaxi.com.br/parker/produtos-omrom-plc.pdf>>, 2007.

SILVA, P.P.D. **Dispositivo para o aumento da eficiência energética de motores de indução trifásicos acionados por inversores de frequência comerciais.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

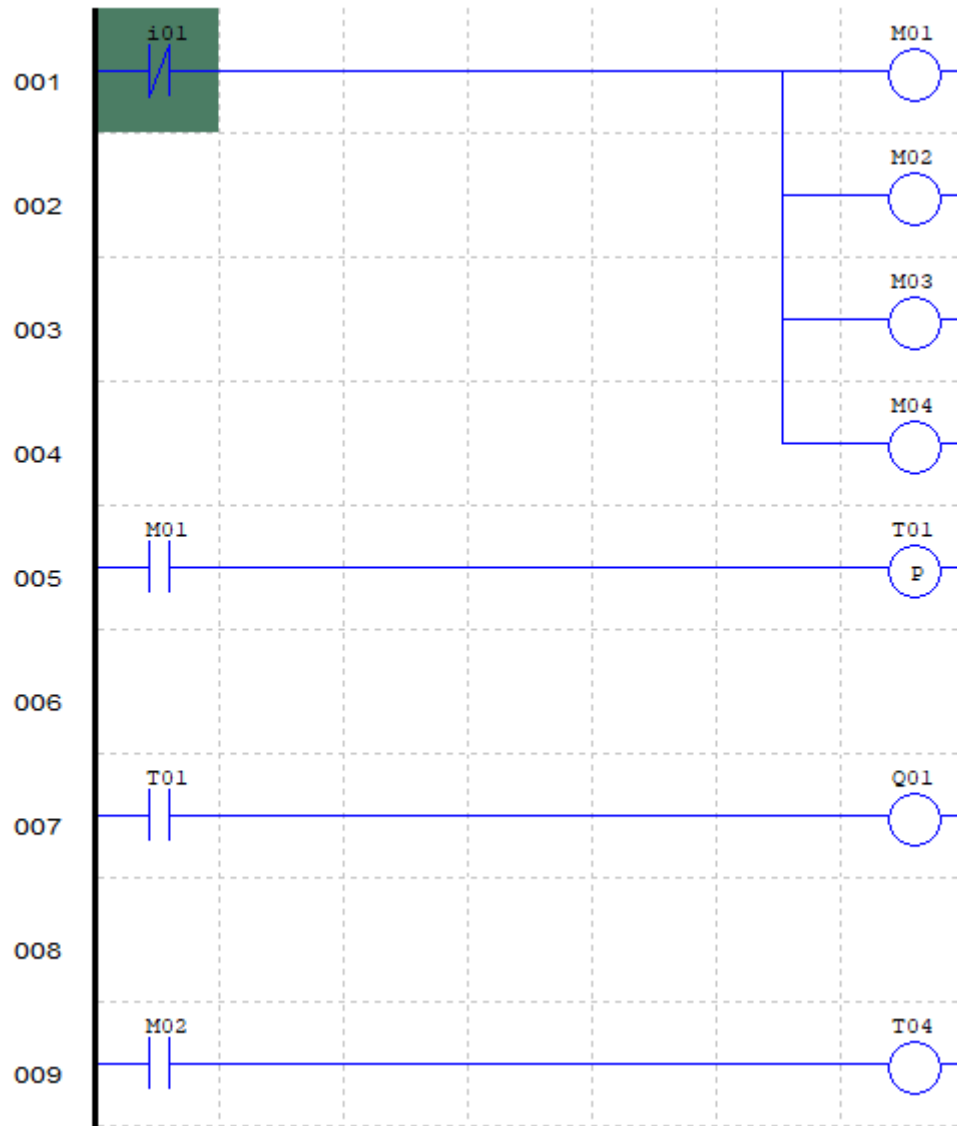
SILVEIRA, P.R.; SANTOS, W.E. **Automação e Controle Discreto.** 1ª ed. Editora Erica, São Paulo, 1988.

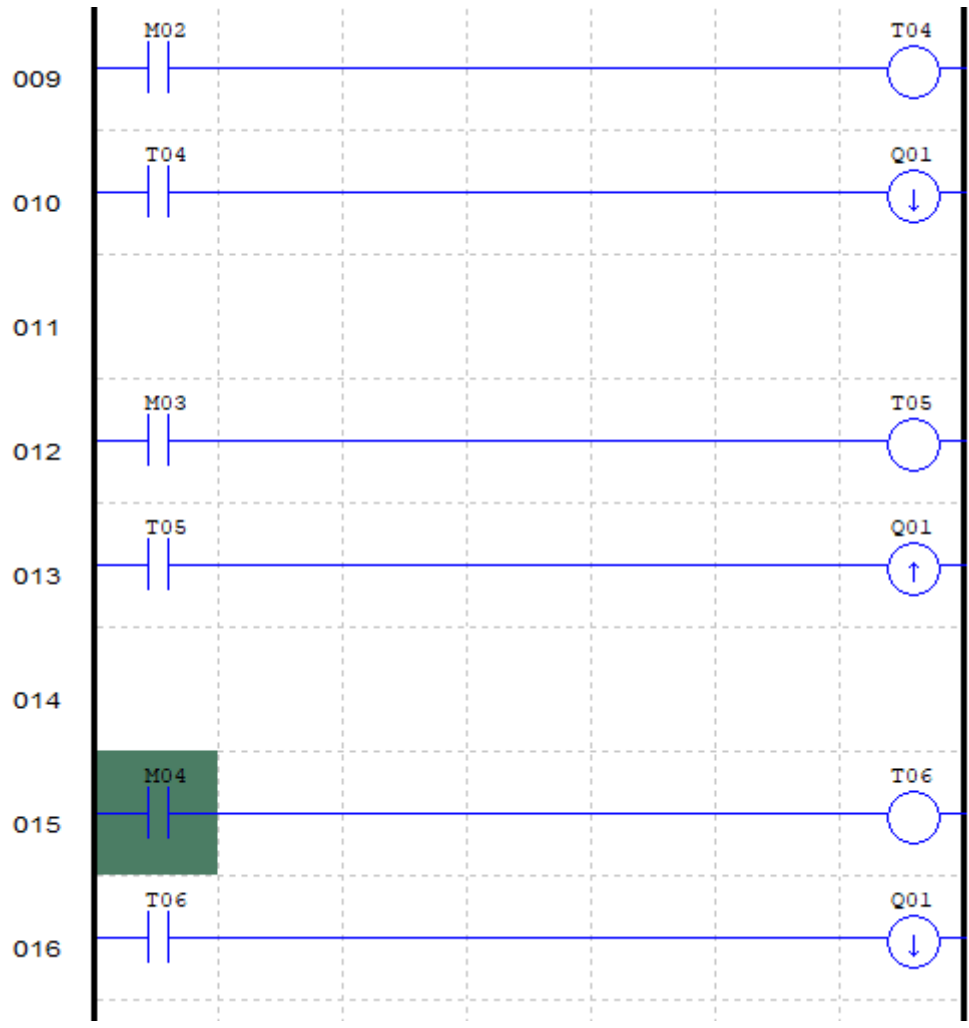
SOLA, A.V.H.; MOTA, C.M.M. **Melhoria de eficiência energética em sistemas motrizes industriais,** Production Journal, vol.25, n.3, p.482-497, 2015.

THIRIEZ, A. **An environmental analysis of Injection Molding.** Trabalho de conclusão de curso, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts,2004.

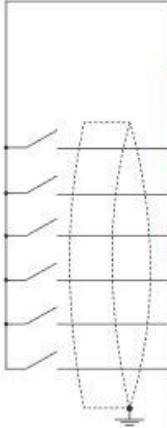
THUMMAN, A.P.E.; YOUNGER, W.J. **Handbook of energy audits.** 7ª ed - The Fairmont Press, 2008.

APÊNDICE A – Programação do CLP





APÊNDICE B – Portas utilizadas para *multi-speed* do inversor



13	24 Vcc	Fonte 24 Vcc	Fonte de alimentação 24 Vcc, $\pm 8\%$ Capacidade: 500 mA Nota: Nos modelos com opção alimentação externa do controle em 24 Vcc (CFW11...O...W...) o pino 13 de XC1 é considerado uma entrada, ou seja, o usuário deve prover uma fonte para o inversor (para mais detalhes consulte Item 7.1.2 Alimentação Externa do Controle em 24 Vcc na página 7-2). Nos demais modelos esse pino é considerado uma saída, ou seja, o usuário tem disponível uma fonte +24 Vcc
14	COM	Ponto comum das entradas digitais	
15	DI1	Entrada digital 1: Gira/Para	6 entradas digitais isoladas Nível alto ≥ 18 V Nível baixo ≤ 3 V Tensão de entrada máx. = 30 V Corrente de entrada: 11 mA @ 24 Vcc
16	DI2	Entrada digital 2: sentido de giro (remoto)	
17	DI3	Entrada digital 3: sem função	
18	DI4	Entrada digital 4: sem função	
19	DI5	Entrada digital 5: Jog (remoto)	
20	DI6	Entrada digital 6: 2ª rampa	
21	NF1	Saída digital 1 DO1 (RL1): sem falha	Capacidade dos contatos: Tensão máxima: 240 Vca Corrente máxima: 1 A NF - contato normalmente fechado C - comum NA - contato normalmente aberto
22	C1		
23	NA1		
24	NF2	Saída digital 2 DO2 (RL2): $N > N_x$ - velocidade > P0288	
25	C2		
26	NA2		
27	NF3	Saída digital 3 DO3 (RL3): $N^* > N_x$ - referência de velocidade > P0288	
28	C3		
29	NA3		