

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO AQUECIMENTO DE UM FORNO A GÁS E À INDUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE EXTRUSÃO DE ALUMÍNIO

Leandro Capanema Faust¹

André Abelardo Tavares²

Resumo: Dentre as várias etapas do processo para obtenção do perfil de alumínio, é necessário o aquecimento do tarugo para ser possível a sua modelagem conforme formato desejado, o qual é realizado através de um forno de indução magnética. O presente trabalho tem por finalidade realizar a análise de consumo energético, econômico e indicadores de manutenção de equipamentos com aquecimento a gás e à indução magnética, visando indicar qual possui melhor eficiência. Assim, foi possível concluir que, o aquecimento por gás natural é mais eficiente em razão de todos indicadores em análise serem melhor em relação ao aquecimento por indução. Logo, objetiva-se a redução do consumo energético em uma linha de extrusão, a fim de tornar a empresa mais competitiva no mercado nacional.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Extrusão de Alumínio. Gás natural. Indução Magnética. Indústria.

1 INTRODUÇÃO

Com o constante aumento da competitividade do mercado e crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil, a eficiência no consumo energético tem papel fundamental para sobrevivência de uma indústria. Reduzir o desperdício de energia e focar em fontes mais eficientes faz com que o preço do produto final se torne mais baixo para o cliente.

Cada vez mais, uma crescente dúvida, motivada pelas incertezas da indisponibilidade energética ou por restrições ambientais, é considerada nesse meio. De qualquer forma, seja qual for a motivação para promover a eficiência energética, é essencial usar o conhecimento de forma aplicada, empregando os conceitos da engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos. Contudo, dada a diversidade e complexidade desses sistemas, é importante apresentar técnicas e métodos para definir objetivos e ações para melhorar o desempenho energético e reduzir as perdas no processo.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica. E-mail: <leandro_capanema@hotmail.com>.

² Professor Doutor André Abelardo Tavares. E-mail: <andre.tavares@satc.edu.br>.

O projeto se tornará importante à unidade de Tubarão/SC da empresa Hydro, pois analisará a possibilidade de redução nos gastos com produção, proporcionando, conseqüentemente, mais estabilidade no equipamento, e, com isso, a margem de lucro do produto final será maior.

A Hydro é, mundialmente, uma das maiores empresas de alumínio. É de origem norueguesa e possui operação em cerca de 40 países ao redor do mundo, sendo ativa em todos os continentes. Além da produção de alumínio primário, produtos laminados, extrudados e reciclagem, também lavra bauxita, refina alumina e produz energia. Ela está presente em todos os segmentos do mercado de alumínio, com atividades comerciais em toda a cadeia de valor, atendendo a mais de 30.000 clientes [1].

1.1 OBJETIVO GERAL

Diante da análise dos indicadores de consumos energéticos, aplicar os conceitos no setor de extrusão de alumínio, para determinar qual tipo de aquecimento é mais eficiente.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar através de leitura de dados obtidos em fornos com aquecimento a gás e por indução magnética qual apresenta melhor desempenho relacionado à:

- Eficiência Energética;
- Eficiência Econômica;
- Indicadores de manutenção.

2 CONSUMO DE ENERGIA NAS INDÚSTRIAS

Tendo em vista a competitividade do mercado de perfis de alumínio e o aumento do custo de energia elétrica no Brasil, a eficiência no consumo energético é fundamental para a sobrevivência de uma indústria. A redução do gasto com insumos faz com que o preço do produto ofertado torne-se mais baixo para o cliente. Com essa premissa, seguem os principais tópicos abordados pelo presente trabalho.

O Balanço Energético Nacional (BEN) é um relatório realizado de forma anual, que é de responsabilidade da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). É uma das mais completas e sistematizadas bases de dados do setor energético brasileiro, que apresenta desde a extração ao uso energético final, reconhecido como parte indispensável e fundamental nas projeções e estudos de energia [2].

Com todas as incertezas do atendimento futuro à demanda de energia elétrica, já comprovada por históricos de “apagão” no Brasil, faz-se necessária uma análise da racionalidade do uso desse vetor energético, através do BEN. A energia elétrica é indispensável e um dos maiores custos da atividade industrial, sendo esse setor responsável por 36% do consumo total do país. Historicamente, a indústria apresenta-se como maior consumidora de energia elétrica [2].

Nesse dinâmico processo, a ampliação da produção provoca uma maior demanda de energia elétrica. Em relação ao consumo residencial de energia elétrica, no caso de países emergentes como o do Brasil, esse efeito é provocado pelo aumento do uso e aquisição de bens de consumo, sobretudo, de eletroeletrônicos.

O primeiro relato de uso de gás natural como combustível foi na China, em que este era utilizado para a realização de secagem de pedras de sal. A expansão deste gás no mercado brasileiro ocorreu a partir da década de 80, com o início da produção do gás natural na Bacia de Campos, ampliando-se a partir da década de 90, com a importação do gás da Bolívia, onde desde então o energético conquistou um espaço relevante na matriz energética do país [3].

As reservas de gás natural no Brasil ainda estão em abundância e possuem uma baixa emissão de poluentes quando comparado a outros combustíveis fósseis, uma vez que a disponibilidade de energias renováveis ainda não atende à demanda nacional e os problemas ambientais permanecem. Em relação aos demais combustíveis fósseis, a queima deste gás emite 31% menos gás carbônico, 39% menos óxidos de nitrogênio e, praticamente, não gera dióxido de enxofre e particulados [4].

Dessa forma, o gás natural vem substituindo energéticos tradicionais como a lenha, a eletricidade, o gás liquefeito de petróleo (GLP), o óleo diesel e o óleo combustível. O maior percentual de utilização do gás natural está nas indústrias, em virtude de suas características técnicas e econômicas [4].

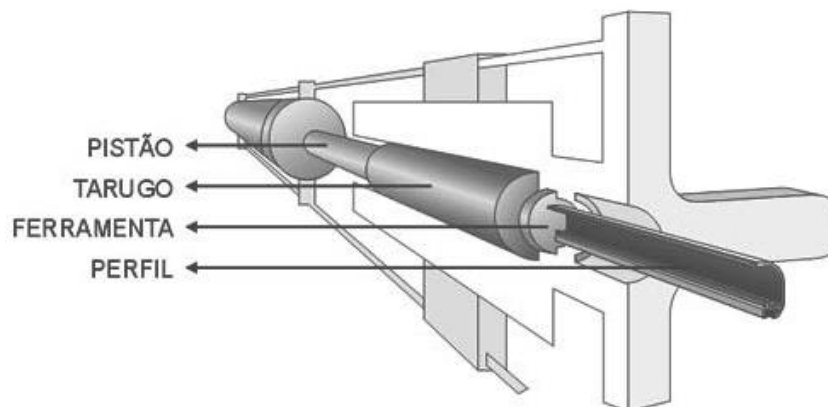
2.1 EXTRUSÃO DE ALUMÍNIO

O processo de extrusão de alumínio é um procedimento em que ocorre a deformação do tarugo com o intuito de adequá-lo aos mais diferentes tipos de aplicações. Consiste em prensar um tarugo contra uma ferramenta, que ao passar pelo orifício da mesma, faz com que seja modelado para uma aplicabilidade específica, formando o perfil de alumínio, muito utilizado na construção civil e em produtos acabados, existindo, assim, uma infinidade de tipos de perfis. Há duas classificações para esse tipo de produto: o tubular, que possui uma seção transversal com pelo menos um furo vazio, e o tipo sólido, que não possui nenhuma seção vazia [5].

Há mais de uma forma de executar o processo de extrusão, que dependem da maleabilidade do material. Para o caso do alumínio, utiliza-se o método em alta temperatura. Esse fenômeno assemelha-se ao funcionamento de uma seringa de injeção [6].

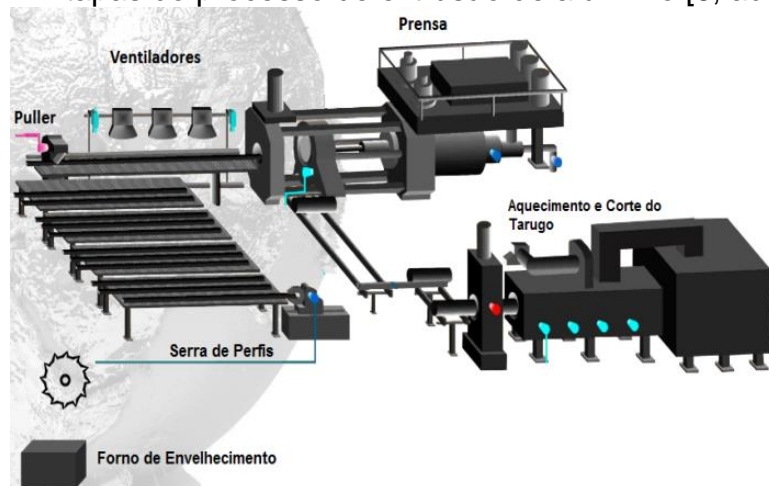
O processo de extrusão inicia-se com a chegada do tarugo de alumínio com, aproximadamente, 6 metros de comprimento e 7 polegadas (0,17 metro) de diâmetro. Com sua chegada, ele é levado à etapa de aquecimento, que pode ser efetuado através de energia elétrica ou gás natural. Após ser aquecido, o tarugo é levado até o centro da prensa onde se inicia o processo de extrusão (passagem à pressão elevada do tarugo através de uma matriz). A Fig.1 demonstra o processo de formação do perfil de alumínio [6].

Figura 1: Processo de formação perfil de alumínio [5, adaptado].



Com o perfil já no formato desejado, o mesmo é puxado pelo *Puller* que o guia até o final da mesa, onde passará pelo processo de resfriamento até chegar à temperatura ambiente, para que possa ser esticado. Em seguida, chegará à Serra de Perfis, onde será cortado de acordo com o tamanho solicitado pelo cliente. Posteriormente, é levado até o Forno de Envelhecimento, com o intuito de realizar um tratamento térmico conferindo ao perfil resistência mecânica. A Fig. 2 ilustra as principais etapas e equipamentos que contemplam o processo produtivo de perfis de alumínio.

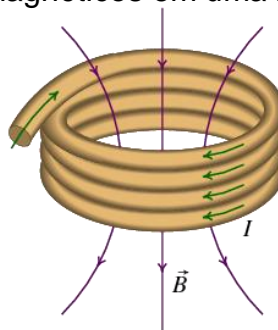
Figura 2: Etapas do processo de extrusão de alumínio [8, adaptado].



2.2 AQUECIMENTO POR INDUÇÃO MAGNÉTICA

O aquecimento por indução magnética é realizado com a criação de uma corrente elétrica que induz um campo magnético \vec{B} na peça a ser aquecida, conforme a Fig. 3, isso faz com que seja gerado um calor de forma a elevar a temperatura da peça.

Figura 3: Campos magnéticos em uma bobina [7, adaptado].



O conceito do funcionamento desse forno é baseado na lei de Faraday, que diz que durante um intervalo de tempo (Δt) o fluxo magnético ($\Delta\Phi$) varia, onde a força eletromotriz é dada pela relação entre variação do fluxo magnético e a variação de tempo, esta fórmula é dada pela Eq. (1) [7].

$$\varepsilon = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

ε [V]: Força eletromotriz induzida;

$\Delta\Phi$ [Wb]: Variação de fluxo magnético;

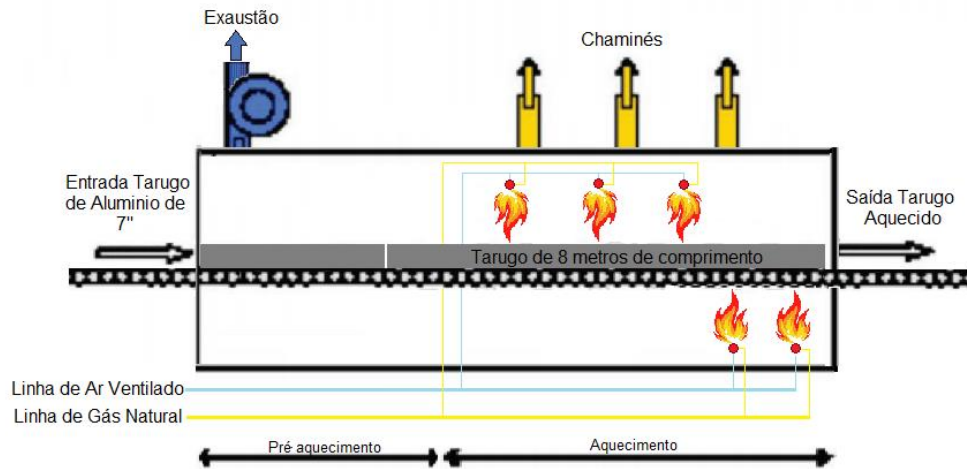
Δt [s]: Intervalo de tempo.

Em geral, as correntes são induzidas na superfície externa do tarugo, conseqüentemente, o calor é gerado nessa zona. O núcleo do tarugo é aquecido pela condução do calor do exterior para o centro durante o ciclo de aquecimento. Assim que a energia é desligada, essa diferença de temperatura desaparece rapidamente com o tempo [7].

2.3 AQUECIMENTO POR GÁS NATURAL

O aquecimento por gás natural do tarugo de alumínio é realizado através de um forno contínuo de roletes com queima direta, no qual a peça sofre um tratamento térmico controlado até atingir a temperatura desejada, conferindo a ela a maleabilidade necessária para a realização do processo de extrusão. O aporte de calor é feito pela combustão de gás natural em cinco queimadores distribuídos nas paredes laterais do forno voltados diretamente à peça a ser aquecida, conforme ilustra a Fig. 4.

Figura 4: Esquema de um forno de Roletes [Do autor, 2018].



A vazão de gás natural em cada queima é regulada automaticamente por servo válvulas motorizadas, as quais mantêm a mistura ideal entre o ar ventilado e o gás com o perfil programado de temperaturas. O comburente utilizado é o ar e sua vazão é regulada de forma manual em cada queimador.

2.4 INDICADORES ENERGÉTICOS

Eficiência energética é a atividade que busca realizar o melhor uso das fontes de energia disponíveis. A utilização de energia de forma racional consiste em usá-la de forma eficiente para obtenção de seus resultados. Em resumo, a eficiência energética consiste da relação entre a parcela de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua relação.

Os indicadores energéticos são fundamentais para o processo de acompanhamento, avaliação e diagnóstico dos processos industriais e são utilizados para medir o desempenho econômico do sistema de aquecimento. O custo unitário de energia representa a quantidade de kWh consumidos por tonelada de alumínio extrudado, conforme Eq. (2) [8].

$$V_{gt} = \left(\frac{Q_{ce}}{V_p} \times V_{kwh} \right) + \left(\frac{Q_{cg}}{V_p} \times V_{m^3} \right) \quad (2)$$

Onde:

V_{gt} [R\$]: Valor financeiro gasto para produzir uma tonelada de perfil de alumínio;

Q_{ce} [kW]: Quantidade absoluta de consumo de potência elétrica;

V_p [ton]: Volume produzido em toneladas;

V_{kWh} [R\$]: Valor financeiro pago pelo kWh de energia elétrica consumida;

Q_{cg} [m³]: Quantidade absoluta de consumo de gás natural;

V_{m^3} [R\$]: Valor financeiro pago pelo m³ de gás natural consumido.

No consumo do gás natural são empregadas duas unidades de medida: o metro cúbico (m³) e o quilowatt-hora (kWh), sendo o primeiro utilizado apenas como forma de referência de leitura para registrar o volume consumido. De acordo com diretrizes europeias, ficou estabelecido que a cobrança do consumo deve ser em unidade de energia, ou seja, em kWh. Para tal transformação para posterior cobrança, é necessário converter o valor do poder calorífico superior do gás natural que é de 9600 kcal/m³ para a unidade padrão de potência, equivalendo a 11,1648 kWh/m³, e após isso aplicar na Eq. (3) para encontrar o fator de conversão [9].

$$F_{CV} = F_{CT} \times F_{CP} \times PCS \quad (3)$$

Onde:

F_{CV} : Fator de conversão;

F_{CT} : Fator de correção por temperatura;

F_{CP} : Fator de correção por pressão;

PCS [kWh/m³]: Poder calorífico superior do gás natural.

O fator de conversão varia conforme a empresa distribuidora, que, neste caso, é a SCGÁS, cujo fator é de 10,557 kWh/m³ em função das perdas por temperatura e variação de pressão conforme a Eq. (2). Através desse fator de conversão multiplicado pelo consumo, é possível encontrar o consumo equivalente em quilowatt-hora, conforme Eq. (4) [9;10]:

$$C_{kWh} = C_{m^3} \times F_{CV} \quad (4)$$

Onde:

C_{kWh} [kWh]: Consumo equivalente em quilowatt-hora;

C_{m^3} [m³]: Consumo de gás natural;

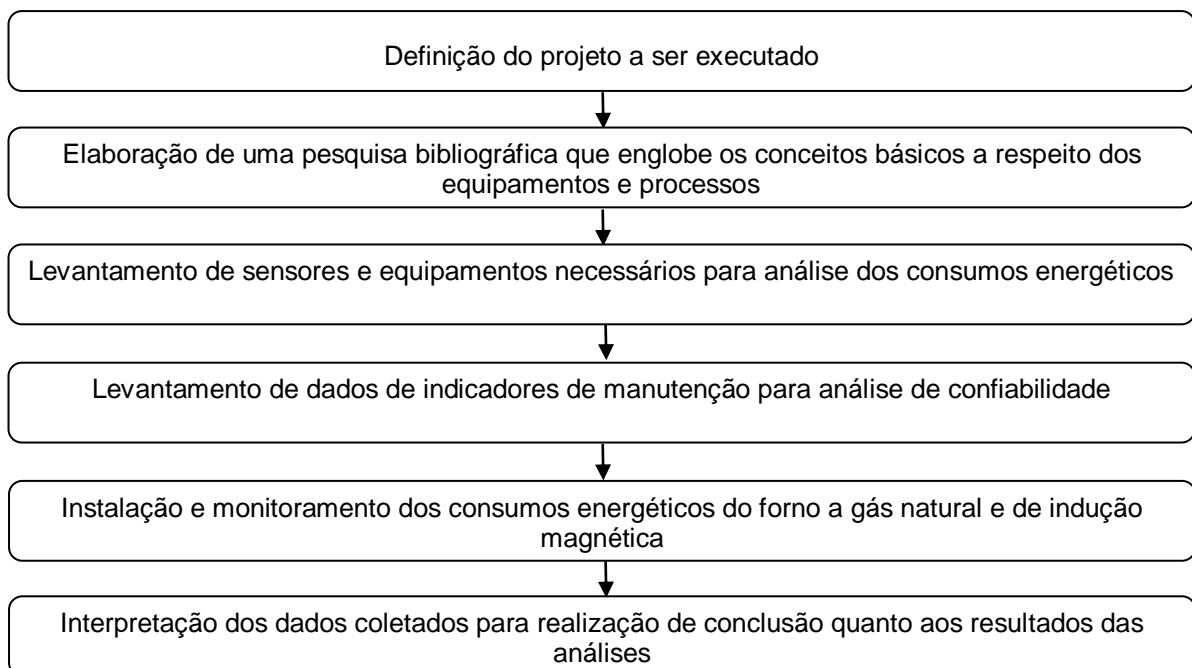
F_{CV} : Fator de Conversão.

O consumo de energia é um valor mensurável absoluto, no sentido em que o valor pode tipicamente ser medido ao longo de um determinado tempo (por exemplo, uma semana, mês ou o ano), ou conforme uma determinada quantidade de produção (quilos, toneladas ou número de peças). Neste projeto, as medições serão realizadas conforme turnos produtivos diários da linha, com levantamento, ao final de cada turno, dos valores de leitura necessários, que conforme o equacionamento determinará a eficiência econômica e energética de cada forno para produzir uma tonelada de perfil de alumínio.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a análise dos fornos de indução magnética e de gás natural, tomou-se como referência o Fluxograma da Fig. 5 que apresenta as etapas do procedimento metodológico, demonstrando a tratativa dos dados até a conclusão desta pesquisa.

Figura 5: Fluxograma de desenvolvimento do projeto [Do autor, 2018].



O presente estudo tem por escopo levantar através de uma análise teórica e experimental, as informações reais de consumos dos dois equipamentos, de maneira a determinar qual forno tem melhor eficiência. A pesquisa foi estruturada por meio de análise das medições realizadas pelos equipamentos instalados.

A primeira etapa compreendeu o levantamento de dados dos dois equipamentos para a busca e escolha de sensores que atendessem às necessidades de medições da magnitude das grandezas físicas para posterior análise dos resultados obtidos.

Em paralelo ao processo de compra dos instrumentos, foi levantado o histórico de dados de manutenção quanto aos indicadores de tempo de serviço executado e número de eventos de manutenção corretiva em ambos os fornos, de forma a demonstrar qual equipamento possui uma maior confiabilidade.

Em seguida, foi realizada a instalação dos sensores no forno de gás natural, a fim de que atendessem aos requisitos mínimos de segurança, conforme a NR 20, a qual cita procedimentos e requisitos de circuitos com gases inflamáveis.

O passo seguinte constituiu-se no acompanhamento, entre os dias 11 a 29 de junho, da leitura das medições dos consumos de gás natural e potência elétrica no forno de gás natural, para cálculo da relação entre gasto e produtividade de perfil de alumínio.

Na sequência, efetuou-se o acompanhamento da leitura de potência elétrica, entre os dias 02 a 20 de julho, no forno de indução magnética, para elaborar relação entre consumo e produção nos mesmos moldes do forno a gás natural.

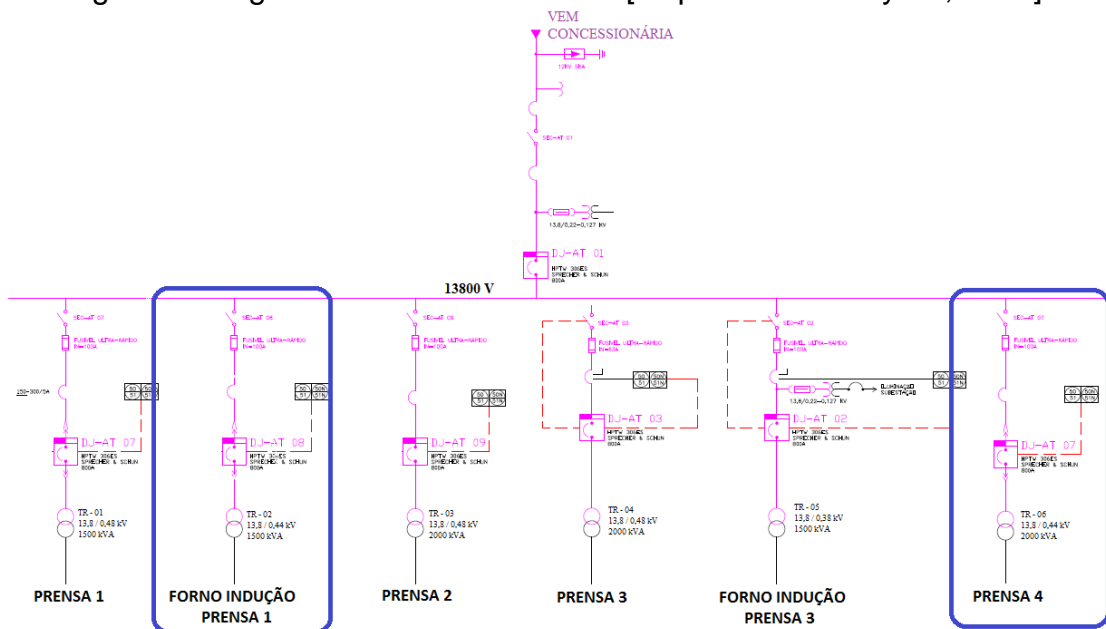
O último passo constituiu-se em realizar uma análise dos dados obtidos de ambos os fornos, para elaboração da comparação do diferencial de gastos em ambos, a fim de verificar o tempo de retorno de investimento para substituição pelo de maior eficiência.

4 ANÁLISE DE DADOS

4.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL

A planta de extrusão de alumínio - tomada como base de estudo - é constituída por quatro linhas de prensa que operam com tarugos de 7” (polegadas) com capacidade de produção de 2.500 toneladas de perfil de alumínio por mês. Essas linhas são segmentadas por 6 transformadores que convertem a tensão de entrada de 13.800V em 440V ou 380V, dependendo da linha. Em destaque, na Fig. 6, que representa o diagrama unifilar da empresa, estão as prensas e o forno em estudo. Na referida figura, demonstra-se que há um transformador exclusivamente para o forno de indução na Prensa 1, e outro para o restante na linha. Já na Prensa 4, há um transformador único para a linha inteira, considerando que a carga elétrica da linha é bastante inferior em razão ao aquecimento do tarugo de alumínio ser por gás natural.

Figura 6: Diagrama unifilar da indústria [Arquivo interno Hydro, 2018].



A Tab. 1 demonstra os equipamentos distribuídos ao longo das duas linhas em estudo e suas respectivas cargas. Na linha da Prensa extrusora 4, há uma potência maior em função de possuir um nível de automatismo maior em relação à Prensa 1, o que resulta em um maior número de equipamentos periféricos.

Tabela 1: Potência nos equipamentos das linhas de extrusão [Do autor, 2018].

Prensa 1		Prensa 4	
Máquina	Potência (kW)	Máquina	Potência (kW)
Forno de Ferramentas	15	Forno de Ferramentas	18
Serra de Tarugos	39	Serra de Tarugos	35
Forno de indução Magnética	728	Forno de Gás Natural	84
Prensa extrusora de alumínio	485	Prensa extrusora de alumínio	750
Serra da Bica	9	Serra da Bica	10
<i>Puller</i>	26	<i>Puller</i>	50
Manuseio	110	Manuseio	131
Esticador de Perfil	30	Esticador de Perfil	19
Serra de Perfis	51	Serra de Perfis	65
Forno de Envelhecimento	37	Forno de Envelhecimento	75
Total	1530	Total	1237

4.2 AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

No aquecimento realizado por um forno de indução magnética, antes de o tarugo de alumínio ser submetido a correntes altíssimas que fazem com que a sua temperatura aumente, ele deve passar por uma serra de tarugos, na qual é realizado o seu corte na medida estabelecida pela necessidade do processo, que varia entre 400 e 650 mm. Com isso, o tarugo é levado por meio de roletes tracionados até que entre no interior do forno, onde é iniciado o aquecimento. Para preservação deste forno, tem-se a necessidade de circulação de água por dentro das espiras da bobina, com o intuito de realizar seu resfriamento, em virtude de um aquecimento indesejado que ocorre na sua parte externa. Após atingir à temperatura definida, o tarugo é levado ao interior da prensa, onde é iniciado o seu ciclo de extrusão.

A linha tomada como estudo para alteração do equipamento de aquecimento utiliza uma bobina de indução magnética do fabricante Ajax. Esse forno industrial consome uma potência de 728 kW e possui outras características conforme a Tab. 2.

Tabela 2: Principais características Forno de Indução Magnética [Do autor, 2018].

	FORNO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA
Potência Nominal	728 kW
Potencia auxiliar elétrica	45 kW
Poder Calorífico	630.000 kcal/h
Capacidade de toneladas/hora	3
Comprimento	2 metros
Controle de Temperatura	On-Off
Pontos Controle de Temperatura	1 Zona
Sistema de Refrigeração	Circulação de Água
Composição Física	Cobre
Tensão de Alimentação	110 V
Método de Corte do Tarugo	Serrado
Tipo de Corte do Tarugo	Frio

O aquecimento é realizado com a introdução da peça no interior da bobina demonstrada abaixo, na qual correntes muito altas, que ultrapassam 1.000 Ampères, passam por ela. A Fig. 7 apresenta uma imagem deste equipamento.

Figura 7: Forno de indução magnética [Do autor, 2018].



O acionamento desse forno é realizado de forma On-Off, quando a temperatura da parte frontal do tarugo de alumínio for abaixo da especificada, consoante a necessidade da receita de produção, faz-se o acionamento do forno com sua potência máxima até que chegue à temperatura estabelecida. As grandes

desvantagens desse tipo de acionamento é a dificuldade na estabilização da temperatura e ajuste do gradiente do tarugo de alumínio, visto que a temperatura de controle é efetuada na parte frontal em um ponto único, onde o ajuste deste diferencial é realizado por meio de alterações no TAP do transformador de entrada, este ajuste faz com que ocorra um desequilíbrio de corrente entre as três partes da espira da bobina.

Por meio das medições realizadas no equipamento, foi possível verificar um grande afundamento de tensão de linha, proveniente do tipo de circuito elétrico utilizado. Referido afundamento provoca distúrbios em outros componentes ligados no mesmo circuito como, por exemplo, a queima de inversores de frequência e queima de sensores. A Tab. 3 demonstra os dados obtidos através das medições realizadas no equipamento.

Tabela 3: Queda de Tensão entre Fases [Do autor, 2018].

	FASES		
	R-S	S-T	R-T
<i>Tensão Linha (Forno Desligado)</i>	481 V	480 V	480 V
<i>Tensão Linha (Forno Ligado)</i>	469 V	469 V	456 V
<i>Corrente Circuito</i>	0,95 kA	0,77 kA	1,27 kA
<i>Queda de Tensão</i>	2,50%	2,30%	5,20%

Conforme demonstrado na Tab. 3, a queda de tensão ocasionado pelo acionamento do equipamento ultrapassa os 5%, que é o limite ideal estipulado pela ANEEL para instalações elétricas.

4.3 AQUECIMENTO POR GÁS NATURAL

O aquecimento por gás natural ocorre ao longo de um tarugo inteiro de comprimento de 8 metros, em que o forno possui 5 zonas de controles de temperaturas com leitura e aquecimento controlados de forma individual por termopares do tipo K. Este aquecimento por inteiro se dá pela necessidade de que o tarugo permaneça por um tempo maior para atingir à temperatura desejada. Após esta etapa, o tarugo é levado para o ciclo de corte, que é realizado através de duas morsas hidráulicas que são empurradas em sentido contrário uma em relação à outra, realizando assim seu cisalhamento. Com isso, o tarugo é levado até a prensa,

onde se inicia o processo de prensamento contra a ferramenta com formato do perfil desejado. A Tab. 4 indica as principais características desse tipo de processo.

Tabela 4: Principais características Forno de Gás Natural [Do autor, 2018].

	FORNO DE GÁS NATURAL
Potência Nominal	1105 kW
Potencia auxiliar elétrica	84 kW
Poder Calorífico	950.000 kcal/h
Capacidade de toneladas/hora	3,5
Comprimento	8 metros
Controle de Temperatura	Proporcional
Pontos Controle de Temperatura	5 Zonas
Sistema de Refrigeração	Ventilação
Composição Física	Ferro-Cerâmica
Tensão de Alimentação	440 V
Método de Corte do Tarugo	Cisalhado
Tipo de Corte do Tarugo	Quente

Para suportar a alta temperatura interna provocada pelo equipamento, há a necessidade que o forno seja revestido por um material isolante, um tipo de refratário cerâmico. Tal material minimiza as perdas por troca térmica com o meio, garante a qualidade da operação e a segurança dos funcionários. A Fig. 8 demonstra o equipamento citado.

Figura 8: Forno a gás natural [Do autor, 2018].

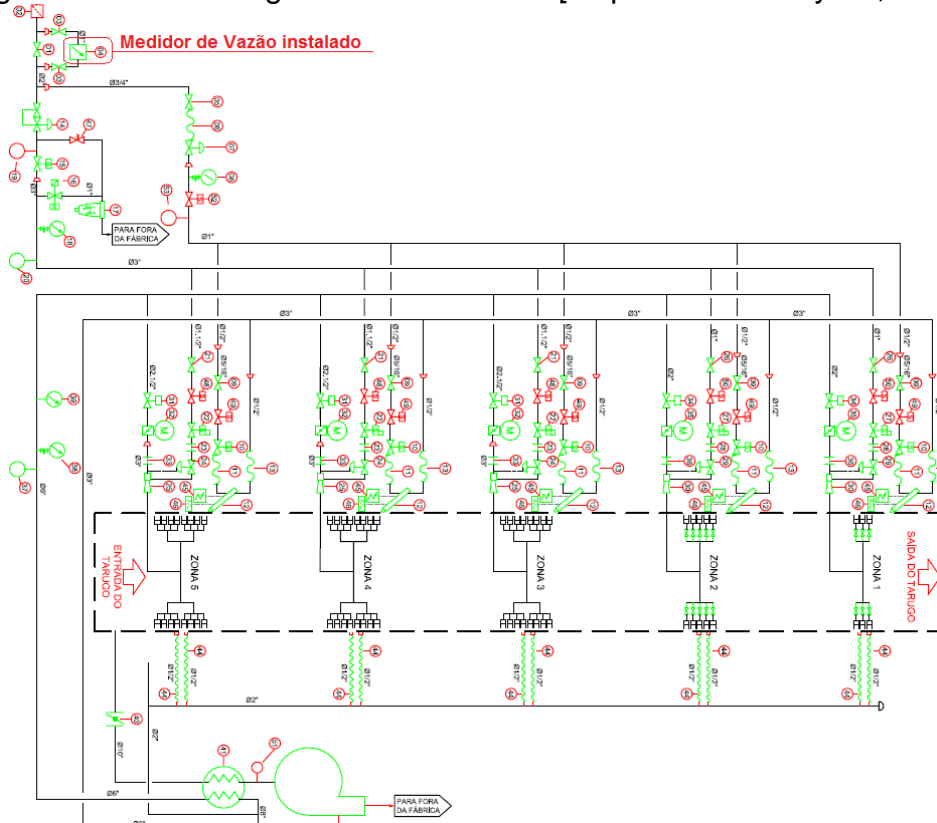


4.4 PROCEDIMENTOS E EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO

Medição é o ato de atribuir um valor específico à uma variável física. Desta forma, para realizar as medições dos consumos de energia elétrica e de gás natural, tornou-se necessária à escolha e aquisição de equipamentos que realizassem a medida de tais grandezas.

Para realizar a medição do consumo de gás, foi instalado um sensor na linha principal do cavalete de entrada do equipamento. A Fig. 9 ilustra o esquema do sistema de gás.

Figura 9: Circuito de gás natural do forno [Arquivo interno Hydro, 2018].



Conforme a Fig. 10, o sensor de vazão escolhido para medição do consumo de gás natural foi o modelo DM 40R25-40, da fabricante Kron Schroder. Este sensor realiza a medida de volumes de gás e ar em equipamentos industriais e, em particular, a verificação e ajuste de queimadores que utilizam gás natural. O volume do fluxo dos gases faz com que rode uma turbina, onde está conectado um acoplamento magnético que é usado para transferir o movimento rotativo da roda da

turbina para o marcador. A velocidade de rotação da roda da turbina é proporcional ao fluxo [11].

Figura 10: Sensor de medição de gás natural [Do autor, 2018].



Em paralelo, para leitura dos consumos de potência elétrica em ambos os equipamentos, foi realizada a compra do analisador de energia modelo Fluke 435, conforme Fig. 11. Este aparelho oferece um conjunto de medições amplo para verificar as grandezas elétricas no equipamento, através da leitura em tempo real da potência aparente total consumida na linha de produção com a instalação de dispositivos de leitura de tensão e corrente, em cada equipamento em análise [12].

Figura 11: Aparelho de medição instalado no forno a gás [Do autor, 2018].



4.5 INDICADORES ENERGÉTICOS

Com a utilização das leituras efetuadas pelos aparelhos de medição nos dois fornos, tornou-se possível realizar um comparativo no mesmo indicador de potência elétrica (kWh), analisando, assim, a sua eficiência energética.

4.5.1 Análise do consumo energético no Forno de Gás Natural

Através da Tab. 5, observa-se a parcela elétrica de potência consumida no forno de gás natural, a parcela de potência equivalente ao consumo de gás natural e a resultante total da soma destas.

Tabela 5: Consumo energético forno de gás natural [Do autor, 2018].

Data	Volume Bruto Produzido (ton)	Potência			Média Diária Consumida (kWh/ton)
		Parcela de Potência Elétrica (kWh)	Parcela de Potência de Gás Natural (kWh)	Total	
11/jun	40,481	448,40	4029,82	4478,22	110,63
12/jun	35,236	441,40	3644,80	4086,20	115,97
13/jun	34,818	444,80	3544,51	3989,31	114,58
14/jun	28,633	415,50	3145,99	3561,49	124,38
15/jun	23,817	310,50	2471,92	2782,42	116,82
18/jun	38,839	473,70	3971,33	4445,03	114,45
19/jun	37,514	465,60	3779,41	4245,01	113,16
20/jun	31,85	458,60	3379,30	3837,90	120,50
21/jun	35,389	450,00	3818,47	4268,47	120,62
22/jun	38,386	492,20	3849,29	4341,49	113,10
25/jun	36,497	467,97	3825,65	4293,62	117,64
26/jun	37,052	473,04	3796,51	4269,55	115,23
27/jun	37,157	478,11	3830,71	4308,82	115,96
28/jun	35,962	462,18	3727,68	4189,86	116,51
29/jun	35,816	465,26	3730,32	4195,58	117,14
Média Global	35,16	449,81	3636,38	4096,20	116,44

Por meio de análise dessas leituras, conforme a Tab. 5, foi encontrada a média de consumo de potência elétrica total em relação à produção de uma tonelada de perfis de alumínio, sendo esse valor de 116,446 kWh/ton, com uma média de custo de R\$ 37,26 por tonelada se sua fonte energética fosse apenas de energia elétrica.

4.5.2 Análise do consumo energético no Forno de Indução Magnética

Mediante a Tab. 6, é permitido verificar o consumo energético diário em relação à produtividade no forno de indução magnética e sua média total final, a fim de tornar possível a análise comparativa entre os fornos.

Tabela 6: Consumo energético no Forno de Indução Magnética [Do autor, 2018].

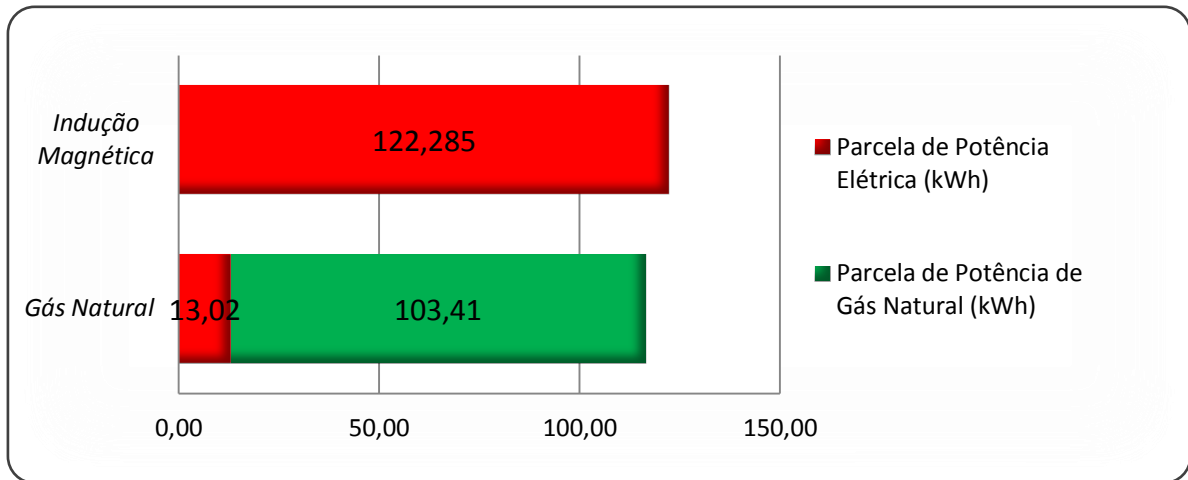
Data	Volume Bruto Produzido (ton)	Energia Elétrica Consumida (kWh)	Média Diária Consumida (kWh/ton)
02/jul	20,514	2529	123,282
03/jul	25,405	3109	122,377
04/jul	24,778	2997	120,954
05/jul	20,406	2430	119,083
06/jul	21,083	2542	120,571
09/jul	13,969	1752	125,421
10/jul	16,043	2029	126,473
11/jul	11,482	1379	120,101
12/jul	22,389	2739	122,337
13/jul	17,386	2120	121,937
16/jul	18,497	2260	122,182
17/jul	16,052	1979	123,287
18/jul	23,157	2819	121,734
19/jul	21,962	2692	122,575
20/jul	14,816	1807	121,963
Média Global	19,19	2345,5	122,28

A partir da média das leituras realizadas, foi encontrada a relação de consumo de energia elétrica de 122,285 kWh/ton produzida, com uma média de custo de R\$ 39,13 por tonelada.

4.5.3 Análise do consumo energético entre os fornos

Considerando o consumo do forno de indução magnética, o forno de gás natural possui uma eficiência de aproximadamente 4,8% a mais por tonelada produzida, conforme demonstra a Fig. 12.

Figura 12: Consumo energético nos fornos [Do autor, 2018].



4.6 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS FORNOS

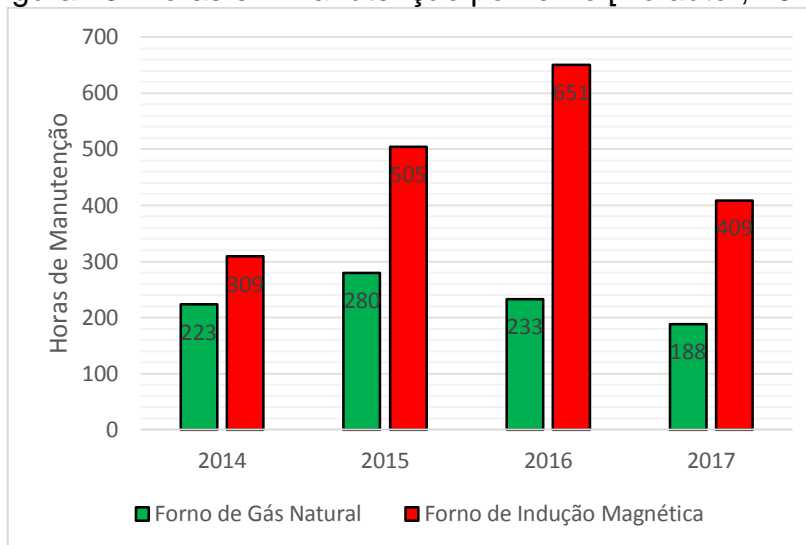
A gestão dos indicadores de manutenção industrial tem como principal objetivo promover a maior disponibilidade e desempenho das máquinas e equipamentos, de forma a garantir o perfeito funcionamento da produção e contribuir para o retorno do investimento.

Para serem mantidos em funcionamento, alguns equipamentos requerem uma determinada demanda de atividades para evitar eventuais manutenções corretivas. Dentre essas demandas, encontram-se as atividades de manutenção produtiva, preventiva e preditiva.

4.6.1 Horas de manutenção anual nos fornos

A Fig. 13 ilustra o número de horas de manutenções preventivas e preditivas do forno de indução magnética e de gás natural, realizadas anualmente.

Figura 13: Horas em manutenção por forno [Do autor, 2018].



Alguns fatores importantes que influenciam nesta disparidade de horas de manutenção do forno de indução magnética são atividades como: troca semestral do equipamento para revisão externa, ajuste de temperatura de gradiente, eliminação de vazamentos de água, alinhamento, reaperto dos contatos de alimentação, revisão do circuito de acionamento e de força, dentre outras.

4.6.2 Interrupções corretivas anuais nos fornos

Outro indicador importante a ser avaliado é a confiabilidade do equipamento durante o funcionamento, a qual pode ser medida através do número de manutenções corretivas. Esse é o tipo de atividade de correção de uma determinada falha ocorrida em um componente do equipamento durante a operação.

Na Tab. 7, demonstram-se os dados de manutenção dos dois equipamentos.

Tabela 7: Histórico de Manutenção corretiva [Do autor, 2018].

	Forno de Indução Magnética		Forno de Gás Natural	
	Número de Interrupções	Tempo (h)	Número de Interrupções	Tempo (h)
2014	34	52	29	27
2015	46	53	20	41
2016	35	49	18	18
2017	22	27	8	8
Total	137	181	75	94

Dentre os vários tipos de interrupções ocorridas no forno de indução magnética, a que mais impacta neste indicador é a ocorrência do rompimento do isolamento elétrico entre a bobina e o tarugo de alumínio, ocorrendo dessa forma um curto circuito fase-terra. Na ocorrência desse tipo de evento, é necessária a realização da substituição do equipamento, que demanda tempo e alto custo para troca do mesmo, bem como atrasos na produção.

4.6.3 Análise de confiabilidade entre os fornos

Conforme a Fig. 10, o forno de indução magnética requer um tempo maior de manutenção ao ano quando comparado ao gás natural. Essa diferença, conseqüentemente, gera um custo mais alto com mão de obra qualificada de técnicos em manutenção. Tomando como base o ano de 2016 e o custo médio por hora de trabalho de R\$ 34,00 por um técnico de manutenção, a diferença de custo pode chegar a R\$ 14.000,00 (quatorze mil reais) ao ano.

O número de eventos, bem como de horas de equipamento parado no forno de indução magnética é maior comparado ao forno de gás natural. Com isso, qualquer falha no forno de indução magnética implicará em diversos contratempos na linha de produção do perfil de alumínio, podendo causar perdas de qualidade no produto, custos altos com mão de obra e peças e perdas de produção.

4.7 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO DE AQUECIMENTO

A partir das mesmas leituras diárias dos consumos de energia e produtividade nos equipamentos utilizados na análise energética, tornou-se possível medir o balanço financeiro e relacionar com a produção em toneladas para determinado período, conforme descrito a seguir.

4.7.1 Análise econômica do Forno de Gás Natural

Diariamente foram levantadas as leituras de gás natural e energia elétrica, consoante demonstrado na Tab. 8. A partir da média das leituras realizadas, foi

possível encontrar a relação de consumo de energia elétrica e gás natural de 12,85 kWh/ton e 9,81 m³/ton.

Tabela 8: Consumo no forno de gás natural [Do autor, 2018].

Data	Volume Bruto Produzido (ton)	Energia Elétrica Consumida (kWh)	Volume de Gás Natural Consumido (m ³)	Média Diária Consumida		
				Parcela Elétrica (R\$/ton)	Parcela de Gás Natural (R\$/ton)	Total
11/jun	40,481	448,40	381,72	3,54	14,80	18,35
12/jun	35,236	441,40	345,25	4,01	15,38	19,39
13/jun	34,818	444,80	335,75	4,09	15,14	19,23
14/jun	28,633	415,50	298	4,64	16,34	20,98
15/jun	23,817	310,50	234,15	4,17	15,44	19,61
18/jun	38,839	473,70	376,18	3,90	15,21	19,11
19/jun	37,514	465,60	358	3,97	14,98	18,95
20/jun	31,85	458,60	320,1	4,61	15,78	20,39
21/jun	35,389	450,00	361,7	4,07	16,05	20,12
22/jun	38,386	492,20	364,62	4,10	14,91	19,02
25/jun	36,497	467,97	362,38	4,10	15,59	19,69
26/jun	37,052	473,04	359,62	4,09	15,24	19,32
27/jun	37,157	478,11	362,86	4,12	15,33	19,45
28/jun	35,962	462,18	353,1	4,11	15,42	19,53
29/jun	35,816	465,26	353,35	4,16	15,49	19,65
Média Global	35,163	449,81	344,45	4,11	15,41	19,52

A partir da média dos consumos relacionados à produtividade e do custo unitário médio, conforme o valor pago pela empresa no acordo com a concessionária, sendo este de R\$ 0,32 kWh e R\$ 1,57 por metro cúbico. Tornou-se possível calcular o custo de R\$ 19,52 para realizar a produção de uma tonelada de perfis de alumínio no forno de gás natural.

4.7.2 Análise econômica do Forno de Indução Magnética

De forma semelhante ao forno de gás natural, foi realizada a medição do consumo de energia elétrica do forno de indução magnética diariamente conforme a Tab. 9.

Tabela 9: Consumo no forno de indução magnética [Do autor, 2018].

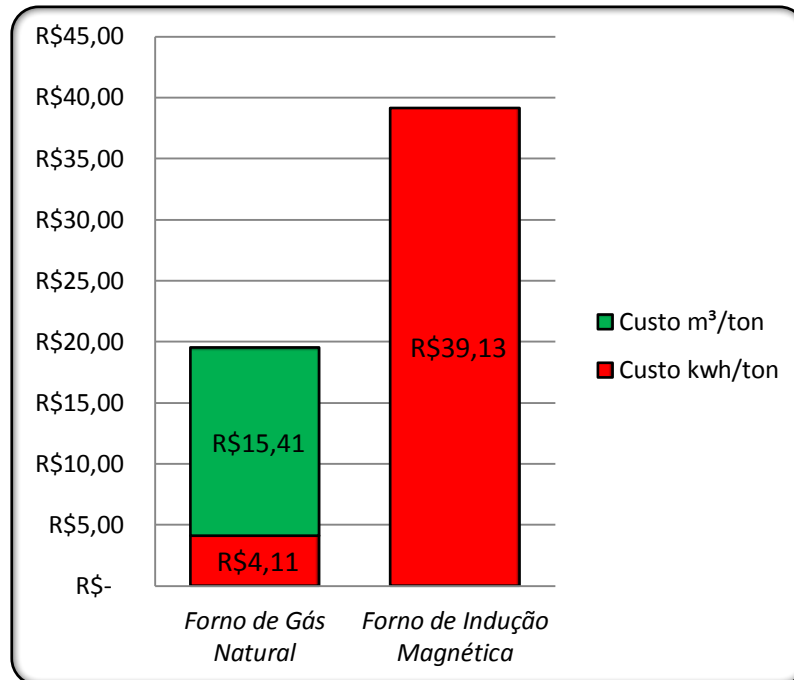
Data	Volume Bruto Produzido (ton)	Energia Elétrica Consumida (kWh)	Média Diária Consumida (R\$/ton)
02/jul	20,514	2529	39,45
03/jul	25,405	3109	39,16
04/jul	24,778	2997	38,71
05/jul	20,406	2430	38,11
06/jul	21,083	2542	38,58
09/jul	13,969	1752	40,13
10/jul	16,043	2029	40,47
11/jul	11,482	1379	38,43
12/jul	22,389	2739	39,15
13/jul	17,386	2120	39,02
16/jul	18,497	2260	39,10
17/jul	16,052	1979	39,45
18/jul	23,157	2819	38,95
19/jul	21,962	2692	39,22
20/jul	14,816	1807	39,03
Média Global	19,195	2345,5	39,13

Através da análise da Tab.9, foi possível realizar o cálculo do consumo em relação à produtividade do equipamento, tendo como base os valores do custo unitário de energia elétrica e gás natural acordados com a concessionária, já citados anteriormente. Desta forma, obteve-se o valor de R\$ 39,13 para realizar a produção de uma tonelada de perfis de alumínio no forno de indução magnética.

4.7.3 Comparativo econômico entre fornos

De acordo com os cálculos de consumo, prova-se que o forno de gás natural consegue realizar a mesma produção de perfis de alumínio com um custo de aproximadamente metade do despendido pelo forno de indução magnética. A Fig.14 demonstra a divisão destes custos e um comparativo de sua proporção.

Figura 14: Custo de produção por tonelada de alumínio [Do autor, 2018].



Conforme demonstrado na Fig. 14, o custo para produção em cada forno está separado por cor, em razão da parcela de gastos de acordo com a sua fonte energética, ou seja, no caso do forno de gás natural há um consumo de energia elétrica em vermelho e de gás natural em verde, e no forno de indução magnética há apenas a parcela de consumo de energia elétrica.

4.7.4 Viabilidade de substituição do equipamento

Haja vista todos os indicadores obtidos, é possível realizar análise de viabilidade de troca do forno de indução magnética por um de gás natural, verificando o tempo de retorno financeiro com a troca. Para essa verificação, tornou-se necessário analisar orçamentos de fornecedores de equipamentos de gás natural. Com o levantamento de custos para substituição, levando em consideração os gastos com mão de obra, projeto e aquisição de um novo equipamento, foi estimado um custo de R\$ 645.000,00 para realização da troca. Com isso, foi criada a Tab. 10, na qual se pode verificar o tempo de retorno a partir das metas de produções.

Tabela 10: Tempo de retorno financeiro [Do autor, 2018].

Ano	Meta de Produção (ton)	Custo de Produção Forno de Indução (R\$)	Custo de Produção Forno de Gás Natural (R\$)	Diferença
2018	-	-	-	-R\$ 645.000,00
2019	7800	R\$ 305.214,00	R\$ 152.256,00	-R\$ 482.042,00
2020	7900	R\$ 309.127,00	R\$ 154.208,00	-R\$ 317.123,00
2021	8050	R\$ 314.996,50	R\$ 157.136,00	-R\$ 149.262,50
2022	8200	R\$ 320.866,00	R\$ 160.064,00	R\$ 21.539,50
2023	8250	R\$ 322.822,50	R\$ 161.040,00	R\$ 193.322,00
2024	8300	R\$ 324.779,00	R\$ 162.016,00	R\$ 366.085,00
2025	8300	R\$ 324.779,00	R\$ 162.016,00	R\$ 538.848,00

A partir da Tab. 10, observa-se que, a partir do ano de 2022, o investimento inicial necessário para substituição do equipamento começa a apresentar retorno, sendo que para essa análise também foi levado em consideração um custo médio de R\$ 10.000,00 de economia anual relacionado aos custos do comparativo de indicador de manutenção.

5 CONCLUSÃO

Para compreensão do estudo, a análise deu-se de forma objetiva a partir da observação dos dados coletados no decorrer desse trabalho, realizando-se ao fim da pesquisa um comparativo entre os equipamentos de aquecimento por indução magnética e por gás natural. Em termos de consumo energético, o forno de gás natural possui uma eficiência melhor do que o de indução, aproximadamente 5% de potência consumida a menos por cada tonelada de produção de perfil de alumínio.

Outro indicador a ser levado em consideração é a confiabilidade dos equipamentos, sendo que o forno de gás natural apresentou uma segurança maior diante de eventuais faltas, mesmo com um número de horas de manutenção muito menor. Com isso, referido forno apresenta um indicador melhor quanto à ocorrência de contratempos na linha de produção do perfil de alumínio, evitando perdas de qualidade no produto, e, conseqüentemente, um menor custo com mão de obra, peças de reposição e perdas de produção.

Ao analisar o consumo econômico, conclui-se que é recomendável a substituição do forno de indução magnética por um de gás natural a partir do

orçamento do custo necessário para tal, tendo em vista que o requisito interno da empresa Hydro, para realização de investimentos é de que o valor de retorno financeiro seja menor ou igual a cinco anos, que, neste caso, é três anos com base nas metas atuais de produção.

As recomendações propostas, neste projeto, refletem o quanto de eficiência energética pode ser conseguida com a implementação de equipamentos mais eficientes, e com a utilização de fontes de energia mais efetivas para tal aplicação. As conclusões ressaltam a importância do uso de indicadores energéticos, análise financeira e indicadores de manutenção, considerando que tais parâmetros incidem diretamente no custo do produto, podendo tornar a empresa mais competitiva no mercado de alumínio.

REFERÊNCIAS

[1] Institucional Hydro. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/>> Acesso em: 03 mar. 2018.

[2] EPE. **Nossa História**. Disponível em: <<http://antigo.epe.gov.br/Documents/LivroEPE-NossaHist%C3%B3ria.pdf/>> Acesso em: 25 mar. 2018.

[3] Bahia Gás. **Gás Natural: O energético mais competitivo**. 1ª ed. Rio de Janeiro - RJ.

[4] VAZ, C. E. M.; MAIA, J. L. P. **Tecnologia da Indústria do Gás Natural**. Rio de Janeiro, 2008.

[5] SENAI – **Treinamento Operacional Setor Prensas**. 1ª ed. Vol. 1. Tubarão.

[6] APAL – Associação Portuguesa de Alumínio. **Processo de extrusão**. Disponível em: <http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/processodeextrusao_620938783533e990ea7f1f.pdf /> Acesso em: 02 de abr. 2018.

[7] BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia – Estática e Quase estática**. 3ª ed. Santa Catarina, 2014.

[8] ELETROBRAS. **Eficiência Energética - Teoria & Prática**. 1ª ed. Vol. 1. Itajubá.

[9] Fatura de gás natural. **Gás natural CUR**. Disponível em: <<http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Mercado-Regulado/Facturacao/Paginas/FacturaGasNatural.aspx>>. Acesso em 17 agosto 2018.

[10] Fator de Conversão. **SCGÁS Companhia de Gás de Santa Catarina**. Disponível em: <<http://www.scgas.com.br/>>. Acesso em 18 agosto 2018.

[11] Krom Schroeder. **Manual do Sensor de Vazão**. Disponível em: <<https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=de&doc=57033/>>. Acesso em 05 maio 2018.

[12] Fluke. **Manual do Analisador de energia**. Disponível em: <https://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf/>. Acesso em 25 maio 2018.