

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO EFEITO DE UM ISOLANTE TÉRMICO NO CONSUMO ENERGÉTICO DE  
UMA MÁQUINA DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO

por

Carolina Vaghetti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2019

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Vaghetti, Carolina  
ESTUDO DO EFEITO DE UM ISOLANTE TÉRMICO NO CONSUMO  
ENERGÉTICO DE UMA MÁQUINA DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO /  
Carolina Vaghetti. -- 2019.  
19 f.  
Orientador: Alexandre Vagtinski de Paula.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Mantas térmicas. 2. Unidade de injeção. 3.  
Consumo energético . 4. Dissipação térmica. I.  
Vagtinski de Paula, Alexandre, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Carolina Vaghetti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRA MECÂNICA**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof<sup>a</sup>. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof./Prof<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry

Prof./Prof<sup>a</sup>. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, Dezembro de 2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por todo apoio, dedicação e compreensão durante toda essa jornada acadêmica.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a todo corpo docente que contribuiu para o meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

Vaghetti, Carolina. **Estudo do efeito de um isolante térmico no consumo energético de uma máquina de injeção de plástico**. 2019. 20 Páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

Tendo em vista que o consumo energético do setor industrial é significativo, seu papel se torna fundamental no caminho em direção à sustentabilidade. Paralelamente a isso, a fabricação e utilização de materiais plásticos tem se tornado cada vez mais presente para diversas funcionalidades. Com base nisso, estudos de redução no consumo energético desse setor se tornam necessários. O presente trabalho tem como objetivo reduzir o consumo energético de uma máquina de injeção de plástico com a utilização de mantas térmicas em seu cilindro de injeção. Para isso, mediu-se o consumo energético da máquina antes da instalação e após a instalação dos isolantes térmicos. Os testes foram realizados durante o inverno. Além disso, foi realizado um modelamento teórico para comparar com os resultados experimentais. Como resultado experimental, obteve-se uma redução real de 51% no consumo energético da máquina, reduzindo de 6,95 kW para 3,39 kW. Assim como, obteve-se uma redução teórica de 62%, reduzindo a potência térmica dissipada de 2071,19 W para 793,20 W. Essa diferença entre os resultados teóricos e experimentais pode ser explicada devido às variações durante a instalação das mantas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mantas térmicas, unidade de injeção, consumo energético e dissipação térmica.



Vagheti, Carolina. **Study of thermal insulator effect on the energy consumption of a plastic injection machine**. 2019. 20 Pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

#### ABSTRACT

Due to energy consumption in the industrial sector is significant, its role becomes crucial in the path towards sustainability. Besides this, the manufacture and the presence of plastic materials have becoming more present for different functionalities. Based on this situation, it is necessary develop studies to reduce energy consumption in this sector. Therefore, the present research goal is to reduce the energy consumption of a plastic injection machine by using thermal insulation in the injection cylinder. For this, the energy consumption of the machine was measured before and after the installation of thermal insulators. The tests were performed during the winter. In addition, a theoretical moulding was developed to compare with the experimental results. As a result, a real reduction of the energy consumption of the machine was 51%, reducing from 6,95 kW to 3,39 kW. As well as, a theoretical reduction of the dissipated thermal power was 62%, reducing from 2071,19 W to 793,20 W. This difference between the theoretical and experimental results can be explained by variations during insulations installation.

**KEYWORDS:** Thermal insulation, injection unit, energy consumption and thermal dissipation.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1. Máquina de injeção de plástico .....	2
2.2. Processo de injeção de plástico .....	2
2.3. Transferência de calor em estado estacionário.....	4
2.3.1. Condução.....	4
2.3.2. Convecção .....	4
2.3.3 Radiação .....	5
2.4. Isolamento térmico .....	5
2.5. Balanço energético em uma superfície.....	5
3. CASO DE ESTUDO .....	6
3.1. Descrição da máquina de injeção em estudo.....	6
3.2 Parâmetros do experimento .....	8
3.3. Seleção da manta térmica .....	9
3.4. Medições do consumo energético da máquina de injeção .....	10
3.5. Medição da temperatura na superfície da manta térmica .....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	10
4.1. Resultados teóricos da potência dissipada sem isolamento térmico .....	10
4.2 Resultados da temperatura superficial nos isolantes térmicos .....	11
4.3. Resultados teóricos da potência dissipada com isolamento térmico.....	12
4.4. Resultados práticos da potência dissipada sem isolamento térmico .....	13
4.5. Resultados práticos da potência dissipada com isolamento térmico.....	13
4.6. Discussão.....	14
5. CONCLUSÕES.....	15
5.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
ANEXOS.....	17
ANEXO A – Informações técnicas das resistências. ....	17
ANEXO B – Informações técnicas do termo-higrômetro utilizado para medir a temperatura ambiente no dia das medições do consumo energético da máquina. ....	17
ANEXO C – Informações técnicas do equipamento Embrasul RE6000 utilizado para medir o consumo energético da máquina. ....	18
ANEXO D – Informações técnicas da câmara térmica utilizado para medir a temperatura superficial das mantas térmicas.....	18
APÊNDICE – Memorial de cálculo das potências dissipadas com e sem isolamento térmico ....	18



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria possui um papel fundamental para desenvolver uma transformação na nossa sociedade em direção à sustentabilidade. Kellens et al. (2013) apresentaram que em 2012 o setor industrial foi responsável por aproximadamente 25% do consumo total de energia na Europa e 28% em escala mundial. Paralelamente a isso, conforme afirmam Kohlitz et al. (2015), o aumento da eficiência energética, assim como, o aumento da eficiência de processos industriais são conhecidos como os principais elementos para instaurar uma economia ambientalmente menos prejudicial.

Simultaneamente a isso, atualmente os produtos em material plástico tem uma significativa presença em diversos setores da indústria mundial. Segundo Fisher (2005), em 2000 estimou-se que, dos brinquedos produzidos, 42% eram fabricados em plástico. Assim como pequenos eletrodomésticos possuem 33% de seu material de plástico e também corresponde a 38% dos materiais utilizados para produzir sistemas de monitoramento e controle.

Devido à significativa presença dos polímeros na sociedade, e atrelado ao desenvolvimento da tecnologia e dos processos industriais, foram desenvolvidos diversos métodos de conformação de peças plásticas. Sun e Liu (2011) afirmaram que os métodos de moldagem apropriados são selecionados com base nos requisitos de matéria prima, geometria, estrutura e desempenho do produto, a fim de atender as diferentes demandas.

Dentro dos diversos processamentos para a fabricação de produtos plásticos, Madan et al. (2013) afirmaram que peças plásticas moldadas por injeção são amplamente utilizadas em produtos de consumo e em equipamentos industriais. Meekers et al. (2018) afirmam que o processo de injeção de plástico se tornou o mais popular devido a sua alta eficiência e a sua relação entre custo e benefício. Além disso, Godec et al. (2013) apresentaram que outro destaque desse processo de fabricação é a possibilidade de produzir peças com geometrias complexas e idênticas com componentes e cores diferentes em um mesmo ciclo.

Tendo em vista essas vantagens do processo de injeção de plástico, Elduque et al. (2018) afirmam que a moldagem por injeção é um processo de fabricação que é caracterizado por grandes volumes de produção. Com isso, é necessário um elevado consumo de energia durante as várias etapas deste processo. Sendo assim, Meekers et al. (2018) afirmam que devido à sua grande escala de produção, a indústria de injeção de plásticos é um grande consumidor de energia e, portanto, é necessário desenvolver estudos para aumentar a sustentabilidade nesse setor.

Atrelado a esse fator, Godec et al. (2013) afirmam que os elementos de uma máquina de injeção que consomem energia direta ou indiretamente são: regulador de temperatura do molde, sistema de aquecimento do cilindro de injeção, sistema de controle da máquina, sistema de armazenamento de dados da máquina e equipamentos periféricos (robôs, manipuladores, trocadores de calor e sistema de aquecimento da matéria prima).

Baseado nessa necessidade de reduzir o consumo energético, Ferreira (2016) estudou duas máquinas de injeção de plástico com o intuito de minimizar os consumos energéticos. Com a instalação de isolantes térmicos no sistema de aquecimento do cilindro de injeção, obteve uma redução de 45% da potência térmica dissipada para o ambiente. Além disso, propôs como sugestão de trabalho futuro realizar o estudo energético durante o período do inverno, com condições térmicas ambientais menos favoráveis.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo principal reduzir o consumo energético de uma máquina de injeção, no período do inverno, reduzindo a dissipação da potência térmica da unidade de injeção com a instalação de isolantes térmicos. Os dados experimentais serão realizados medindo o consumo energético da máquina antes e após a instalação da manta isolante. Uma modelagem física e matemática do problema também será realizada a fim de obter um comparativo com o resultado experimental.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Máquina de injeção de plástico

Segundo Pinto (2012), a máquina injetora possui uma estrutura rígida de um lado, com o intuito de suportar os movimentos realizados pelo molde, e do outro lado um cilindro revestido por resistências que tem por finalidade aquecê-lo e mantê-lo aquecido. Na parte interna do cilindro, há um fuso onde ocorre a fusão do polímero. O fuso pode ser movimentado por um motor elétrico ou hidráulico, onde há um cilindro hidráulico para garantir o movimento de avanço. Há uma válvula anti-retorno com o intuito de evitar o refluxo do material para o canal do parafuso. A Figura 1 apresenta uma máquina de injeção comercial e um esquema onde podem ser verificadas suas unidades de funcionamento.

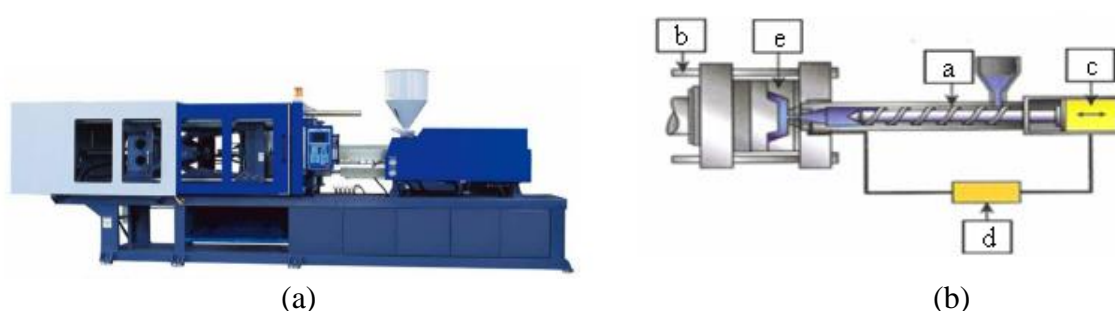


Figura 1 (a) Ilustração de máquina de injeção comercial; (b) Esquema com suas unidades de funcionamento. Fonte: Pinto (2012)

As funções das unidades que compõem a máquina de injeção, conforme apresentadas na Figura 1 e segundo Pinto (2012), são:

- a. Unidade de injeção: local onde ocorre o transporte, aquecimento, plastificação e homogeneização do material, iniciando pelo abastecimento da matéria prima e finalizando no bico de injeção; local onde são garantidas as etapas subsequentes: injeção e compactação do fundido;
- b. Unidade de fecho: onde ocorre a fixação e movimentação do molde. A presente unidade deve ser capaz de manter o molde fechado durante a injeção, compactação e contração. Também é responsável por integrar os dispositivos necessários à extração das peças moldadas;
- c. Unidade de Potência: responsável por fornecer a energia necessária aos atuadores da máquina. De modo geral, é um sistema eletro-hidráulico, onde a bomba é acionada por meio de um motor elétrico;
- d. Unidade de Controle: responsável por garantir a consistência e repetitividade do funcionamento da máquina. Também é responsável por realizar a monitorização e o controle dos parâmetros de processos, operações e dispositivos necessários para o ciclo de injeção;
- e. Molde: responsável por determinar a geometria final da peça a ser injetada. É constituído por uma ferramenta de, pelo menos, duas partes que são mantidas fechadas durante todo o período de injeção e subsequente arrefecimento, abrindo posteriormente no momento de extração da peça moldada.

### 2.2. Processo de injeção de plástico

Conforme apresentado por Pinto (2012), o processo de injeção de plástico é considerado um processo cíclico. O conjunto de etapas necessárias para a produção de uma peça plástica injetada

é chamado de ciclo de injeção. O polímero em formato de grãos é carregado em uma máquina onde será aquecido, fundido e injetado sob pressão para dentro de um molde, que pode possuir mais de uma cavidade. Dentro do molde, após o preenchimento de todas as cavidades, a peça moldada passa pelo processo de resfriamento, abaixo da temperatura de fusão do plástico. Por fim, o molde é aberto e a peça moldada é extraída. A Figura 2 ilustra as etapas do ciclo de injeção.

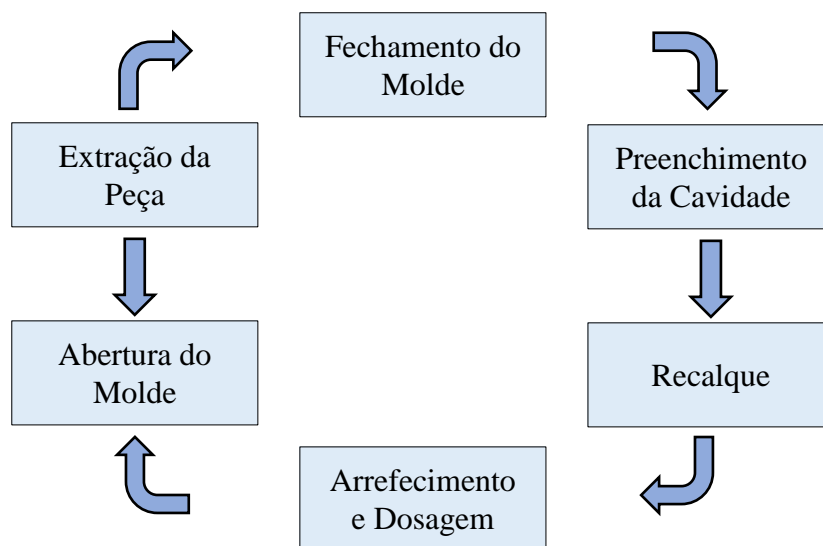


Figura 2: Ciclo completo do processo de injeção

A seguir, são apresentadas as principais etapas do processo de injeção, conforme descrito por Busato (2004):

- a. **Fechamento do Molde:** a matéria prima plastificada é acumulada na parte frontal do fuso, sendo que as resistências do cilindro são responsáveis por mantê-lo na temperatura ideal de processo até o início da injeção. Por seguinte, a unidade injetora é avançada até a bucha de injeção, o molde é fechado e, a partir disso, a cavidade pode ser preenchida;
- b. **Preenchimento da Cavidade:** a matéria prima é rapidamente injetada para dentro da cavidade do molde, após já ter ocorrido a dosagem e já estar plastificado. O período de injeção varia conforme a geometria da peça e do sistema de alimentação. Enquanto o material preenche a cavidade, o ar que está no interior é forçado a sair por meio de espaços existentes entre o molde e os pinos injetores, assim como, por frestas projetadas para sua saída;
- c. **Recalque:** com o intuito de compensar as contrações do material, após toda a cavidade já ter sido preenchida, o fuso continua a pressurização para dentro do molde;
- d. **Arrefecimento e Dosagem:** para ser possível realizar a extração da peça, depois que a cavidade foi preenchida e recalcada, é necessário realizar o arrefecimento da peça até sua temperatura de extração. Paralelamente à fase de arrefecimento, inicia-se o retrocesso da unidade de injeção, ocorrendo a dosagem e plastificação de uma nova quantidade de material para o próximo ciclo. Pode-se afirmar que essa é a fase mais longa do ciclo de injeção convencional;
- e. **Abertura do Molde e Extração da Peça:** o molde só pode ser aberto assim que a peça atingir a temperatura abaixo da qual não ocorre mais variação na sua dimensão, tanto por contração, diferença de temperatura ou deformação pela ação dos pinos injetores.

### 2.3. Transferência de calor em estado estacionário

Em concordância com Incropera et al. (2008), a transferência de calor pode ser definido como a energia térmica em movimento devido a uma diferença entre as temperaturas no espaço. Sendo assim, sempre que houver um gradiente de temperaturas em um meio, haverá transferência de calor. Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

#### 2.3.1. Condução

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), a condução é o modo de transferência de energia que ocorre das partículas mais energéticas de uma determinada substância para partículas vizinhas menos energéticas, devido à interação entre elas. Sendo assim, conforme afirmado por Incropera et al. (2008), a condução pode ocorrer em meio sólido ou fluido estacionário e está correlacionada com conceito das atividades moleculares e atômicas, pois esse modo de transferência de calor é mantida por processos nesses níveis.

#### 2.3.2. Convecção

Conforme apresentado por Çengel e Ghajar (2012), a convecção é o modo de transferência de energia que abrange os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. Além disso, afirmam que a convecção pode ocorrer entre a superfície sólida e a líquida (ou gás adjacente) que está em movimento.

Além disso, Incropera et al. (2008) afirmam que a natureza do escoamento do fluido determina a classificação da transferência de calor por convecção. Para um escoamento causado por meios externos, tais como bombas, ventiladores ou ventos atmosféricos, classifica-se como convecção forçada. Por outro lado, quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, classifica-se de convecção livre ou natural.

Çengel e Ghajar (2012) afirmam que a taxa de transferência de calor por convecção é expressa pela lei de Newton do resfriamento, conforme apresentada pela Equação 1:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

onde,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/(m^2.K)$ ),  $A$  é a área da superfície pela qual a transferência de calor por convecção ocorre ( $m^2$ ),  $T_s$  é a temperatura na superfície ( $K$ ) e  $T_\infty$  é a temperatura do fluido ( $K$ ).

Tendo em vista que o presente trabalho apresenta uma condição de convecção natural, Incropera et al. (2008) afirmam que o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser obtido por meio da correlação empírica do número de Nusselt para cilindro horizontal, conforme apresentado na Equação 2:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,6 + \left\{ \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + 0,559/Pr]^{9/16} [8/27]} \right\}^2 \quad (2)$$

onde  $D$  é o diâmetro externo do cilindro ( $m$ ),  $k$  é a condutividade térmica do fluido ( $W/(m.K)$ ),  $Pr$  é o número adimensional de Prandtl e  $Ra_D$  é o número adimensional de Rayleigh (descreve a relação entre a flutuação e a viscosidade dentro do fluido) que pode ser obtido conforme apresenta a Equação 3:

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \quad (3)$$

onde  $g$  representa a aceleração da gravidade ( $m^2/s$ ),  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica do fluido ( $K^{-1}$ ),  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ ) e  $\alpha$  é a difusividade térmica do fluido ( $m^2/s$ ). Importante ressaltar que a Equação 2 é válida apenas para valores de  $Ra_D$  inferiores ou iguais à  $10^{12}$ .

### 2.3.3 Radiação

Incropera et al. (2008) explicam a radiação como a energia emitida pela matéria que se possui uma temperatura diferente de zero. Independente de sua geometria, a emissão ocorre devido à mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria.

Çengel e Ghajar (2012) também explicam que diferentemente da condução e convecção, a transferência de calor por radiação não necessita a presença de um meio interveniente. A taxa líquida de transferência de calor por radiação  $q_{rad}$ , em W, entre duas superfícies é dada pela Equação 4:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

onde  $\varepsilon$  é uma propriedade radiante da superfície conhecida como emissividade e varia entre 0 (zero) e 1 (um), e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ).

## 2.4. Isolamento térmico

Conforme definido pela norma ASTM C 168 (2000), um isolante térmico é um material que tem como objetivo dificultar a transferência de calor, ou seja, de aumentar a resistência à passagem de calor. Assim, isolar termicamente tem o intuito de tornar mais difícil a transferência de calor entre dois sistemas que se encontram a diferentes temperaturas.

Conforme apresentado por Suetake (2017), o isolante térmico é composto por materiais ou combinações de materiais que dificultam o fluxo de calor. Esses isolantes são usualmente de três tipos:

- 1 Materiais Inorgânicos: são os materiais fibrosos e celulares, compostos por fibra de vidro e lã de rocha, silicato de cálcio e vermiculite;
- 2 Materiais Orgânicos: são divididos em materiais fibrosos e celulares, formados por celulose algodão, madeira, fibras sintéticas, poliestireno, poliuretano e outros polímeros;
- 3 Metálicos ou Membranas Refletivas: mantas compostas por materiais de baixa emissividade.

## 2.5. Balanço energético em uma superfície

Conforme apresentado por Incropera et al. (2008), é necessário aplicar a lei da conservação de energia entre um meio e uma superfície. Afirmam Çengel e Ghajar, (2012) que a primeira lei da termodinâmica, também conhecida como o princípio da conservação de energia, determina que a energia pode apenas mudar de forma, mas não pode ser criada nem destruída durante um processo. A Figura 3 apresenta um esquema do balanço energético para a conservação de energia na superfície de um cilindro que foi revestido com isolamento térmico. Como pode ser observado, ocorrem as três formas de transferências de calor em um cilindro isolado: condução, convecção e radiação. Neste caso,  $T_1$  é a temperatura na superfície do cilindro,  $T_2$  representa a temperatura na superfície do isolante térmico,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido,  $r_1$  é o raio do cilindro,  $r_2$  o raio do cilindro com isolamento térmico,  $R_{rad}$  a resistência térmica por radiação,  $R_{conv}$  a resistências térmica por convecção,  $R_{cond}$  a resistência térmica por condução e por fim  $Q$  a energia total do sistema.

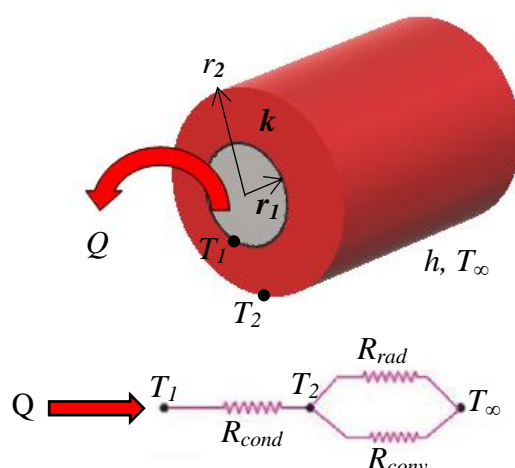


Figura 3: Representação do balanço energético para a conservação de energia.

De acordo com o exposto acima, o balanço de energia assume a forma representada na Equação 5:

$$q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (5)$$

Sendo assim, pode ser considerado que a potência térmica dissipada por condução através do isolamento térmico é igual ao somatório do calor dissipado por convecção e radiação para o ambiente (Ferreira, 2016).

### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1. Descrição da máquina de injeção em estudo

O presente trabalho foi realizado em uma empresa de bens de consumo situada na região metropolitana de Porto Alegre. Essa empresa possui um departamento de injeção de plástico onde estão instaladas 14 injetoras de plástico. O presente estudo foi realizado na máquina de injeção de plástico da marca Engel, cujo modelo é o Victory 300ton. Optou-se por essa máquina em específico devido ao seu alto volume de produção, o que torna mais viável realizar as medições. A máquina em estudo é ilustrada na Figura 4.



Figura 4: Ilustração da máquina de injeção de plástico onde foram realizadas as medições.

Fonte: Engel Global (2019)

Conforme mencionado anteriormente, restringiu-se o estudo para uma parte da máquina: a unidade de injeção (também chamado de cilindro de injeção). Nesse local ocorre o aquecimento e homogeneização do material a ser injetado. Essa parte da máquina é composta por um cilindro que possui um fuso dosador. Esse cilindro é revestido por resistências distribuídas ao longo do

seu comprimento que o aquecem até temperaturas ideais de processo. Sendo assim, o cilindro de injeção possui duas regiões distintas: as resistências de aquecimento e o cilindro não coberto.

Para garantir que toda a matéria prima tenha sido fundida e esteja homogeneizada antes de ser injetada no molde, o cilindro de injeção é dividido em zonas de aquecimento, onde sua temperatura aumenta gradativamente até atingir a temperatura do bico de injeção. As temperaturas de cada zona são consideradas parâmetros do processo, pois variam de acordo com o material a ser injetado. A Figura 5 ilustra as quatro zonas de temperatura do cilindro da máquina do presente estudo, de onde se observa que o cilindro de injeção da máquina possui quatro zonas de aquecimento. Neste estudo foi utilizado o polímero de poliamida 6 da marca Lanxes, com 30% de sua composição em fibra de vidro para melhor absorção de impacto.

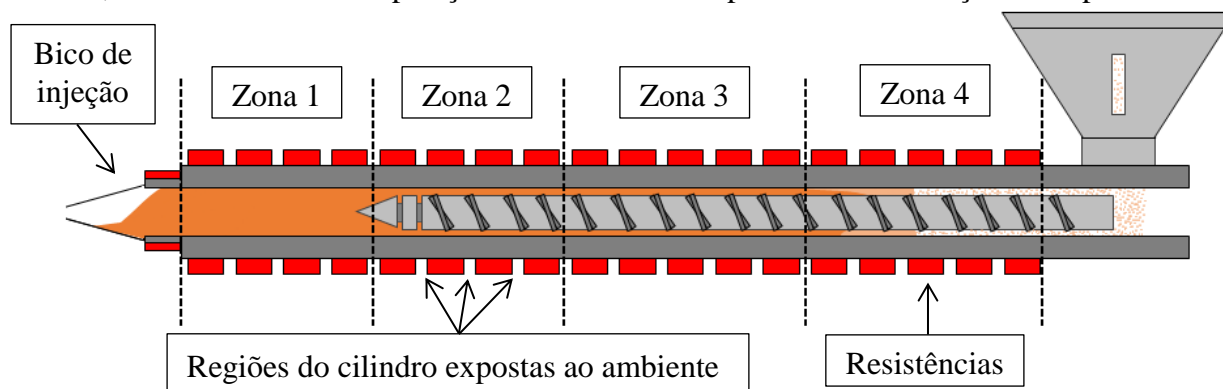


Figura 5: Ilustração da divisão do cilindro de injeção pelas suas zonas de aquecimento e seus componentes.

Conforme descrito por Blasio (2007), as temperaturas em cada zona do fuso e do canhão devem ser bem controladas, pois a plastificação do polímero dentro do fuso depende de diversos fatores, como velocidade do fuso, geometria do fuso e tipo de material utilizado. Cada material deve ser testado para se determinar a temperatura ótima de processo em cada zona do cilindro. Com base nisso, após serem determinadas as temperaturas ótimas de processo, resultou-se que o material utilizado exige as temperaturas de operação conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Temperaturas de operação para o material utilizado

Zona	Temperatura do cilindro (°C)
1	280
2	265
3	260
4	250

A máquina possui quatro termopares, um para cada zona de aquecimento, com o intuito de monitorar as temperaturas das respectivas zonas. O controlador da máquina realiza esse monitoramento e as temperaturas de cada zona são mostradas no painel de controle da máquina.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros dimensionais da unidade de injeção dividida pelas zonas de aquecimento. Observa-se que a máquina em estudo possui 18 resistências em seu cilindro de injeção. A parte dos comprimentos do cilindro não cobertos pelas resistências, foram obtidos por meio do somatório de todas as distâncias entre as resistências. Pela Tabela 2, também é possível constatar que os comprimentos do cilindro nas zonas 2 e 4 são maiores que os das zonas 1 e 3, respectivamente. Isso se deve ao fato da máquina possuir dois parafusos com olhais, cuja funcionalidade é a de erguer o cilindro de injeção, estando estes posicionados nas zonas 2 e 4, aumentando assim a área do cilindro não coberto.

Tabela 2: Parâmetros da unidade de injeção

<b>Parâmetros</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>
Número de resistências	4,000	4,000	5,000	5,000
Diâmetro das resistências (m)	0,150	0,150	0,150	0,150
Diâmetro do cilindro (m)	0,128	0,128	0,128	0,128
Comprimento das resistências (m)	0,050	0,050	0,050	0,050
Comprimento do cilindro não coberto (m)	0,040	0,070	0,050	0,060
Área total das resistências (m <sup>2</sup> )	0,094	0,094	0,118	0,118
Área total do cilindro (m <sup>2</sup> )	0,016	0,028	0,020	0,026
Emissividade das resistências	0,400	0,400	0,400	0,400
Emissividade do cilindro	0,450	0,450	0,450	0,450

Foi verificado no catálogo e diretamente com o fornecedor das resistências (as informações técnicas estão disponíveis no Anexo A) que o seu material superficial é aço inoxidável 316. Segundo Incropera et al. (2008) e Çengel e Ghajar (2012), para aços inoxidáveis polido deve-se considerar uma emissividade de 0,17. No entanto, tendo em vista que as resistências estavam expostas ao ambiente, observou-se uma oxidação leve em suas superfícies. Sendo assim, foi considerada uma emissividade de 0,4 para as resistências, conforme a faixa definida por Çengel e Ghajar (2012).

De acordo com as especificações técnicas das resistências presente no Anexo A, elas possuem uma potência máxima de 1,5 kW. No entanto, apenas um percentual dessa potência é utilizado durante a produção. As resistências são ligadas e após atingirem as temperaturas de processo, a unidade de controle apenas as mantém nessas temperaturas, por meio de um processo de ligar e desligar.

Com o intuito de verificar a emissividade do material do cilindro, tentou-se contato com o fornecedor da máquina. No entanto, em virtude de confidencialidade de informações, não foi possível informar a composição deste material. Tendo em vista que Ferreira (2016) realizou um estudo semelhante com uma máquina de injeção de plástico do mesmo fornecedor, foi utilizado o mesmo valor de emissividade para o cilindro: 0,45.

### 3.2 Parâmetros do experimento

Avaliando-se as Equações 1 e 4, é necessário mensurar a temperatura do fluido e suas propriedades físicas nessa temperatura para realizar o cálculo da potência dissipada. A máquina de injeção é posicionada dentro de uma fábrica e o cilindro de injeção é exposto ao ambiente sem possuir ventilação forçada. Sendo assim, foi considerado o ar como o fluido e seu escoamento classificado como ventilação natural.

A fim de realizar o cálculo, mediou-se a temperatura ambiente no dia em que as medições de consumo elétrico da máquina foram realizadas. Para isso, foi utilizado um termo-higrômetro da marca Minipa, modelo MT-241. Como todos os equipamentos de medição da fábrica, ele possui selo de calibração e com prazo de vencimento para o ano de 2020. De acordo com o Anexo B, onde consta as informações técnicas do termo-higrômetro, a exatidão do valor lido da temperatura é de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Verificou-se uma temperatura ambiente de  $17^{\circ}\text{C}$  no dia das medições antes da instalação das mantas térmicas. Tendo em vista que a instalação exige uma parada de máquina e um tempo longo de instalação, não foi possível realizar as duas medições no mesmo dia. Sendo assim,



houve uma variação na temperatura ambiente entre as duas medições da ordem de 3° C para mais, uma vez que no dia das medições com a manta térmica, a temperatura era de 20° C.

A tabela 3 apresenta as propriedades do fluido para ambos os dias de medição. Tendo em vista que a variação de temperatura entre os dois dias foi pequena (apenas 3°C), observa-se que as variações nas propriedades do fluido também foram pequenas.

Tabela 3: Propriedades do ar nas temperaturas de medição. Fonte: Incropera et al. (2008)

<b>Parâmetros</b>	<b>Dados sem a manta térmica</b>	<b>Dados com a manta térmica</b>
Temperatura ambiente ao ar (K)	290	293
Coef. de expansão térmica (K <sup>-1</sup> )	3,45x10 <sup>-3</sup>	3,41 x10 <sup>-3</sup>
Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)	1,50x10 <sup>-5</sup>	1,53 x10 <sup>-5</sup>
Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)	2,12 x10 <sup>-5</sup>	2,16 x10 <sup>-5</sup>
Condutividade térmica (W/m.K)	2,55 x10 <sup>-2</sup>	2,57 x10 <sup>-2</sup>
Número de Prandt (Adimensional)	7,10 x10 <sup>-1</sup>	7,09 x10 <sup>-1</sup>

A injetora do presente estudo produz mais de 5 peças distintas, que possuem matéria prima, molde, e geometria diferentes. Logo, possuem parâmetros de processos distintos entre elas. Conforme visto anteriormente, o material a ser injetado influencia diretamente nas temperaturas de aquecimento do cilindro de injeção. Com base nesse fato, um cuidado que se teve durante as medições do consumo energético da máquina foi realizar as medições nos momentos que se estivesse produzindo a mesma peça sob os mesmos parâmetros de produção.

### 3.3. Seleção da manta térmica

Tendo em vista que a máquina em estudo possui alto volume de produção, é necessário incluir seus componentes relacionados à manutenção em estoque. Esse fato ocorre com o intuito de diminuir o tempo de manutenção ou parada de máquina. Com base nisso, como as mantas térmicas precisarão ser substituídas por término de vida útil ou possível danificação durante alguma manutenção preventiva, foi necessário considerá-las como item de estoque. Atrelado a isso, outros equipamentos já possuíam mantas térmicas. Sendo assim, com o intuito de não aumentar a diversidade de materiais em estoque para uma mesma finalidade e, tendo como base o fato da aquisição das mantas possuírem retorno econômico com a redução prevista, optou-se por utilizar os mesmos isolantes térmicos que já são utilizados na fábrica atualmente e que possuem um bom desempenho. A Tabela 4 apresenta os dados técnicos da manta térmica selecionada.

Tabela 4: Parâmetros técnicos dos isolantes térmicos utilizados na unidade de injeção.

<b>Parâmetros</b>	<b>Dados</b>
Material isolante	Material inorgânico - Fibra cerâmica
Material superficial da manta	Tecido de sílica
Largura da manta (m)	0,080
Diâmetro interno (m)	0,150
Espessura (m)	0,025
Emissividade (adimensional)	0,750

De acordo com Incropera et al. (2008), a emissividade de tecidos varia entre 0,75 e 0,9. Arelado a isso, Ferreira (2016) realizou um estudo semelhante, e utilizou para os cálculos uma emissividade de 0,75 para o material isolante. Com base nessas referências, no presente estudo também foi considerado o valor de 0,75 para a emissividade do material superficial da manta térmica. É importante ressaltar que, devido à largura das mantas ser apenas 3 mm maior que a largura das resistências, elas foram projetadas para isolar apenas as resistências elétricas, não sendo considerado o isolamento do cilindro de injeção. Sendo assim, a parte do cilindro que está exposta ao ambiente, não foi projetada para ser coberta pelo isolamento térmico.

### **3.4. Medições do consumo energético da máquina de injeção**

Para realizar as medições do consumo energético da máquina de injeção foi utilizado o equipamento Embrasul RE6000, que foi projetado para medir simultaneamente os sinais de quatro canais de corrente elétrica e quatro canais de tensão elétrica. O equipamento possui diversas funções, sendo que uma delas é determinar a frequência das medições. Com o intuito de obter um considerável número de medições, decidiu-se realizar uma medição a cada minuto. O presente equipamento é utilizado diariamente para diversas aplicações da fábrica e possui selo de calibração dentro do prazo de validade. Além disso, segundo o catálogo do equipamento, possui uma exatidão de 0,5% do valor medido. O Anexo C apresenta as informações técnicas do equipamento Embrasul RE6000 disponibilizadas pelo fabricante.

### **3.5. Medição da temperatura na superfície da manta térmica**

Tendo em vista que para calcular a dissipação de calor por radiação e por convecção é necessário ter conhecimento da temperatura na superfície do material, utilizou-se a câmera termográfica da marca Flir, modelo T530. Conforme as informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante (Anexo D), a câmera possui uma exatidão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  do valor lido. Para realizar a medição com esse equipamento é necessário realizar uma configuração inicial informando a emissividade do material a ser medido.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Resultados teóricos da potência dissipada sem isolamento térmico**

Tendo em vista que o fluido não está em estado estacionário, não foi considerada a transferência de calor por condução. Sendo assim, calculou-se a potência dissipada ao ambiente via convecção e radiação.

A Figura 6 ilustra os resultados dos cálculos teóricos da potência dissipada ao ambiente via convecção e radiação do cilindro de injeção por suas zonas de aquecimento sem isolamento térmico. Os resultados de potência dissipada são apresentados separadamente para cada zona térmica do cilindro. A zona que apresentou maior dissipação, tanto por convecção como por radiação, via resistências elétricas foi a zona 3, que apesar de possuir temperatura menor que a zona 1, é composta por 5 resistências, ou seja, uma a mais que a zona 1. Além disso, é possível observar que a parte do cilindro da zona 2 e 4 apresentaram maiores dissipações, tanto por convecção quanto por radiação. Isso se deve ao fato dessas regiões possuírem maior área de cilindro, conforme mencionado anteriormente, devido ao posicionamento dos parafusos com olhais para levantar a máquina. Outro ponto importante a ser observado é a zona que apresentou menor dissipação de calor com relação às resistências: zona 2. Isso se deve ao fato de possuir apenas 4 resistências e possuir sua temperatura de operação inferior à zona 1. De modo análogo, é possível observar que a região que apresentou menor dissipação de calor pelo cilindro foi a zona 1. Isso ocorre tendo em vista que esta é a região que possui menor área de cilindro exposta,

mesmo sendo a região que possui menor temperatura. Por fim, pode-se verificar que a diferença entre uma zona e outra é de no máximo 49,25 W, o que representa 2,4% do valor total dissipado. O Apêndice apresenta o memorial de cálculo da dissipação térmica das resistências de uma zona do cilindro, com o intuito de ilustrar o procedimento utilizado para todo o cilindro.

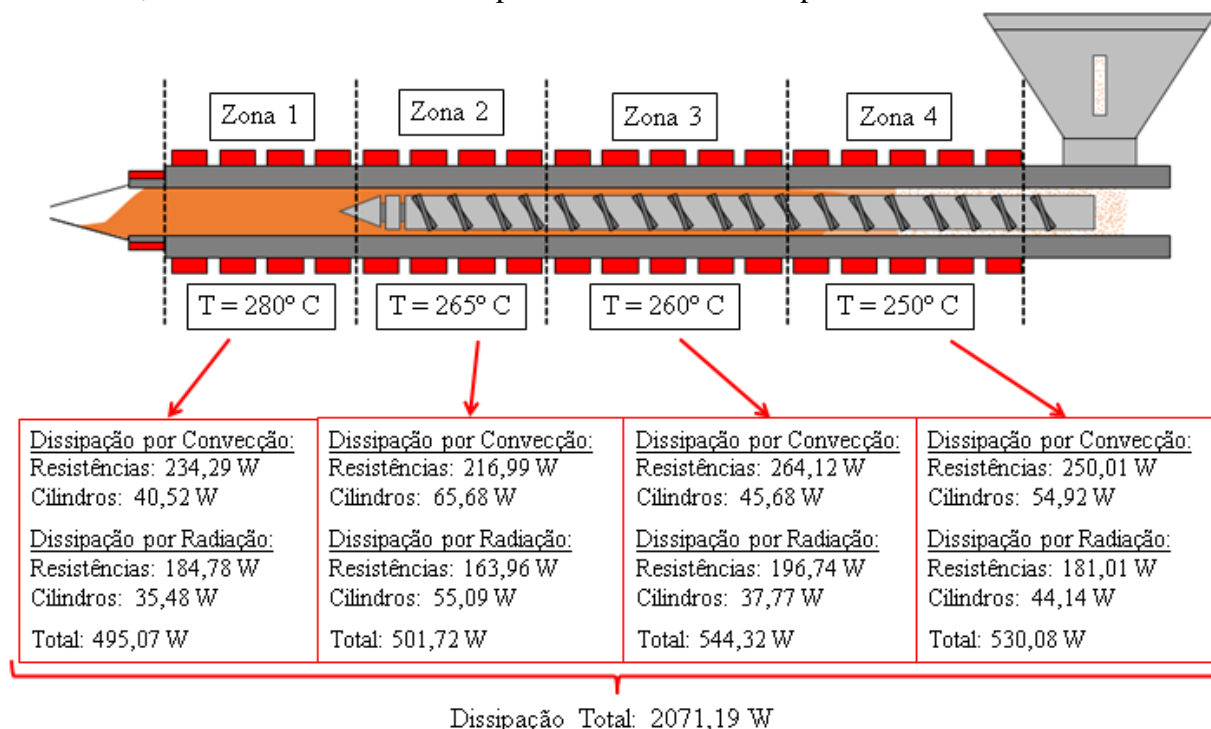


Figura 6: Resultado dos cálculos teóricos da potência dissipada ao ambiente via convecção e radiação sem isolamento térmico.

#### 4.2 Resultados da temperatura superficial nos isolantes térmicos

Após a instalação das mantas térmicas e após a estabilização das temperaturas de operação da máquina em todas as zonas térmicas, foi realizada a medição da temperatura superficial do isolante em cada zona de aquecimento. A Figura 7 apresenta a distribuição térmica na superfície das mantas ao longo do cilindro de injeção, de onde se observa que após a estabilização do processo e, por consequência das temperaturas das mantas térmicas, não há variações térmicas significativas entre as zonas de aquecimento. Sendo assim, foi realizada uma medição por cada zona térmica.

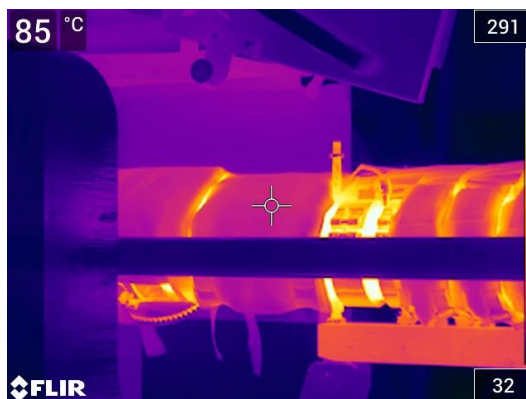


Figura 7: Medição da temperatura superficial da manta térmica, apresentando a distribuição térmica na superfície da manta.

A Tabela 5 apresenta os valores medidos com a câmera térmica, de onde foram consideradas as respectivas temperaturas na superfície da manta térmica de cada zona para a realização dos cálculos teóricos.

Tabela 5: Valores medidos com a câmera térmica para determinar a temperatura em cada zona na superfície da manta térmica.

Zona	Temperatura (° C)
1	85
2	88
3	92
4	91

#### 4.3. Resultados teóricos da potência dissipada com isolamento térmico

A Figura 8 ilustra os resultados dos cálculos teóricos da potência dissipada ao ambiente via convecção e radiação do cilindro de injeção por suas zonas de aquecimento com isolamento térmico. Tendo em vista que não há variações significativas da temperatura na superfície das mantas térmicas entre as zonas, pode ser verificado que a potência dissipada via convecção e radiação das resistências possuem valores próximos nas zonas 1 e 2, pois o número de resistências é o mesmo. Assim como, nas zonas 3 e 4 que possuem a mesma quantidade de resistências, o valor da potência térmica dissipada pelas resistências também é próximo entre essas zonas.

Comparando-se os resultados da Figura 6 com a Figura 8, é possível constatar que a instalação de mantas térmicas resulta em uma redução teórica de aproximadamente 62% da potência dissipada pelo cilindro de injeção.

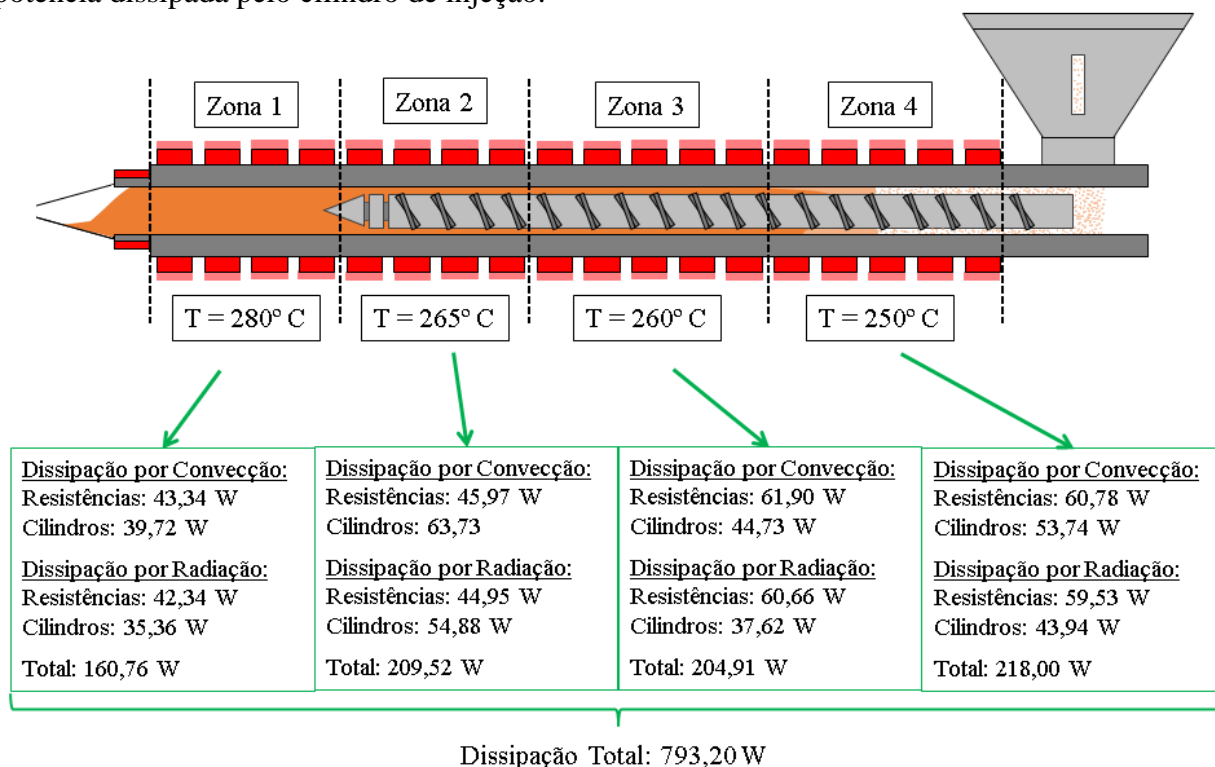


Figura 8: Resultado dos cálculos teóricos da potência dissipada ao ambiente via convecção e radiação sem isolamento térmico.

#### 4.4. Resultados práticos da potência dissipada sem isolamento térmico

Com o intuito de realizar a comparação entre os valores obtidos com os cálculos teóricos e com dados medidos, foi realizada a medição da potência elétrica consumida pela máquina antes e após a instalação das mantas térmicas. Para isso, aguardou-se a estabilização do processo, tendo em vista que o consumo energético da máquina durante a produção mantém-se praticamente estabilizado.

A quantidade de dados medidos variou de acordo com o tempo de produção da máquina para a mesma peça a ser injetada. Sendo assim, devido à programação da máquina, obtiveram-se mais dados antes da instalação das mantas, pois a injetora ficou em produção com a peça durante mais tempo. Após a coleta dos dados, eles foram analisados de acordo com as paradas da máquina. Tendo em vista que o consumo da máquina varia quando está em operação ou em repouso, foram estratificados todos os momentos em que a máquina ficou parada e apenas foram considerados os valores de potência consumida da máquina em operação. A Tabela 6 apresenta o consumo da máquina de injeção antes da instalação das mantas, de onde se verifica que não há variações significativas entre as horas de produção.

Tabela 6: Consumo de potência por hora da máquina de injeção antes da instalação das mantas térmicas:

<b>Hora</b>	<b>Potência média da hora (kW)</b>
22 h	6,95
23 h	6,82
0 h	7,02
1 h	6,98
2 h	6,84
3 h	6,97
4 h	6,96
5 h	6,99
6 h	7,00
7 h	7,02
<b>Média do período total</b>	<b>6,95</b>

Conforme pode ser verificado na Tabela 6, a máxima variação entre as horas é de aproximadamente 0,20 kW, o que representa 2% do valor da média do período total.

#### 4.5. Resultados práticos da potência dissipada com isolamento térmico

A Tabela 7 apresenta o consumo da máquina de injeção após a instalação das mantas, de onde se observa que mesmo após a instalação das mantas não há variações significativas entre as horas de produção. A máxima variação entre as horas é de aproximadamente 0,21 kW, valor próximo do resultado obtido antes da instalação das mantas.

Tabela 7: Consumo de potência por hora da máquina de injeção após da instalação das mantas térmicas:

Hora	Potência média da hora (kW)
19h30min	3,46
20h30min	3,45
21h30min	3,25
22h30min	3,40
23h30min	3,41
<b>Média do período total</b>	<b>3,39</b>

Comparando-se os resultados da Tabela 6 com a Tabela 7, é possível constatar que a instalação de mantas térmicas resulta em uma redução real de 6,95 kW para 3,39 kW, ou seja, de aproximadamente 51% da potência consumida pela máquina de injeção.

#### 4.6. Discussão

Avaliando os resultados apresentados, e tendo em vista que para ambas as análises o único parâmetro variado foi a instalação do isolante térmico, é possível verificar uma variação de aproximadamente 11% entre os resultados teóricos e os medidos experimentalmente. Essa diferença pode ser explicada devido ao fato da manta térmica não cobrir completamente as resistências próximas aos termopares e aos parafusos com olhais. Por outro lado, como as mantas térmicas foram posicionadas muito próximas umas das outras, além de cobrir as resistências, em alguns pontos da unidade de injeção, cobriu-se também parte do cilindro, que não havia sido previsto. A Figura 9 ilustra essas variações de instalação.



Figura 9: Ilustração das variações do isolamento devido à instalação e aos itens da unidade de injeção.

Conforme pode ser verificado na Figura 9, as mantas foram instaladas muito próximas cobrindo além das resistências, o cilindro. Por outro lado, algumas resistências foram cobertas apenas parcialmente devido aos itens periféricos da máquina como termopares e parafusos com olhais. Essas variações tanto positivas (mantas térmicas cobrindo parte dos cilindros que não havia sido previsto) quanto negativas (resistências próximas de termopares e parafusos cobertas apenas parcialmente) são as possíveis causas da variação entre os resultados teórico e real.

Além disso, foram considerados valores médios tanto de emissividade dos materiais quanto das temperaturas nas superfícies das mantas.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo do emprego de uma manta térmica isolante com o intuito de reduzir o consumo energético de uma máquina injetora de plástico no período do inverno. Um modelo físico e matemático simplificado foi empregado para comparar com os resultados medidos durante ocasiões típicas de funcionamento da máquina.

Conclui-se que o emprego de uma manta térmica de fibra cerâmica é eficaz na redução de consumo da máquina, chegando a valores de consumo 51% inferiores aos encontrados para o caso sem o uso de material isolante nas resistências térmicas. Este resultado foi encontrado inclusive no período do inverno, quando se considera condições ambientais mais favoráveis à dissipação de potência térmica.

Foi encontrada uma diferença de 11% entre a modelagem teórica e os resultados experimentais. Essa diferença pode ser explicada devido ao fato de não ter sido possível instalar as mantas térmicas conforme previsto, ocorrendo variações de instalação que são favoráveis ao aumento da potência térmica dissipada (não ser possível cobrir todas as resistências por completo) e desfavoráveis ao aumento da potência térmica dissipada (isolar além das resistências, a parte exposta do cilindro de injeção).

### 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se um estudo mais aprofundado de materiais isolantes e a realização da mesma comparação com outro tipo de material, com o intuito de obter maiores reduções do consumo energético.

Outro aspecto importante observado no presente trabalho foram as regiões não cobertas pelas mantas térmicas. Sendo assim, sugere-se o desenvolvimento de mantas com geometrias diferentes, com o intuito de cobrir completamente com isolante térmico o cilindro de injeção e as resistências, visando obter reduções mais significativas de potência dissipada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C 168 (2000) Terminology relating to thermal insulation, ASTM C 168. West Conshohocken, 2000

Blasio, C. A. D. **Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

Busato, F. A. **Parâmetros de Moldagem por Injeção de Termoplásticos em Moldes Fabricados por Estereolitografia com Resina Somos 7110**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem Prática**. 4ª Edição, Bookman, 2012.

Elduque, A.; Elduque, D.; Pina, C.; Clavería, I.; Javierre, C. **Electricity Consumption Estimation of the Polymer Material Injection-Molding Manufacturing Process: Empirical Model and Application**. Materials: Open Access Journal, 2018.

Engel Global, “**Products**”, <https://www.engelglobal.com>. Acessado em 27/11/2019.

Ferreira, C. M. A. **Estudo energético de uma máquina de injeção de plástico**. Dissertação de Mestrado, Porto, Portugal, 2016.

FISHER, M. M; MARK, F. E.; KINGSBURY, T. **Energy Recovery in the Sustainable Recycling of Plastic from End-of-Life Electrical and Electronic Products**. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2005.

Godec, D.; Sokele, M. R; Serce, M. Processing parameters influencing energy efficient injection moulding of plastics and rubbers. **Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture**, 2013.

Incropera, F. P.; DeWitt D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 6ª Edição, LTC, 2008.

Kohliz, S.; Sundmaeker H.; Herrmann, C.; Spiering, T. **Energy efficiency benchmarking for Injection Moulding Processes** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing v. 36 p. 45–59, 2015.

Madan, J. A.; Mani, M.; Lyons, K. W. **Characterizing energy consumption of the injection molding process**. Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, Madison, 2013.

Meekers, P. R. I.; Rochman, A. Analysis of Process Parameters affecting Energy Consumption in Plastic Injection Moulding. **25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference**, 2018.

Pinto R. J. F. **Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos**. Dissertação de Mestrado, Coimbra, Portugal 2012.

Suetake, G. Y. **Avaliação do Desempenho Térmico de Mantas Isolantes em Guaritas de Fibra de Vidro**. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica do Paraná, 2017.

Sun, L.; Liu, X. M. **Control Analysis of Production and Apparent Quality of Automobile Large Plastic Parts**. International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering, Procedia Engineering vol. 16 p. 438 – 443, 2011.



## ANEXOS

### ANEXO A – Informações técnicas das resistências.

As informações podem ser acessadas em:

<<https://casadasresistencias.com.br/resistencias-eletricas-industriais/resistencias-eletricas-oleira-ceramica-mica-blindada-fundida-para-aquecimento-de-superficies-cilindricas-e-lanas/resistencia-eletrica-para-aquecimento-de-canhao-de-injecao-extrusao-de-plastico.html>>

Aplicação	Canhão
Temperatura	Até 450° C
Material	Aço Galvanizado, Aço Inoxidável 316
Potência	Até 15kW
Tensão	110V, 220V, 380V, 440V

### ANEXO B – Informações técnicas do termo-higrômetro utilizado para medir a temperatura ambiente no dia das medições do consumo energético da máquina.

As informações podem ser acessadas em:

<<http://www.minipa.com.br/temperatura-e-ambiente/termo-higrometros/402-mt-241>>

Display/Contagens	Triplo
Canais	2
Temperatura (T1)	0 ± 50 °C / + 32 ± 122 °F
Temperatura (T2)	- 50 ± 70 °C / - 58 ± 158 °F
Umidade	20 - 90 %
Comprimento do Sensor	293 cm
Tipos do Sensor (T2)	NTC
Visualização	T1/T2
Relógio Integrado	12h ou 24h
Exatidão básica (T1/T2 e UR)	± 2°C e ± 10%
Resolução (T1/T2 e UR)	0,1° C/ 0,1 °F e ± 1%
Alimentação	1x1,5V AAA
Dimensões (mm)/Peso (g)	108x58x15/100
Garantia	3 meses

### ANEXO C – Informações técnicas do equipamento Embrasul RE6000 utilizado para medir o consumo energético da máquina.

As informações podem ser acessadas em:  
< [http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo\\_RE6000\\_v05r00\\_pt\\_HR.pdf](http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo_RE6000_v05r00_pt_HR.pdf)>

Tensões:	Por fase e trifásicas
Correntes:	Por fase e trifásicas
Desequilíbrios:	Percentuais de desbalanceamentos entre as fases de tensão (NEMA e IEC)
Potências:	Ativas, reativas e aparentes por fase totais
Exatidão das potências:	±0,5% + exatidão do acessório de corrente
Fator de Potência:	Indutivo e capacitivo
Faixa do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Exatidão do FP:	±0,5%
Fato de deslocamento:	Indutivo e capacitivo
Faixa do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo
Exatidão do FP:	±0,5%
Distorções:	DHTi, DHTv, TDD, DHT GLOBAL

### ANEXO D – Informações técnicas da câmera térmica utilizado para medir a temperatura superficial das mantas térmicas.

As informações podem ser acessadas em:  
< <https://www.flir.com.br/products/t530/?model=79305-0101>>

Exatidão	± 2 °C (± 3,6 °F) ou ± 2% da leitura
Alarme de cor (isotérmico)	Acima/Abaixo/Intervalo/Condensação (umidade/ponto de condensação)/Isolamento
Diferença de Temperatura	Sim
Tecnologia do Display	IPS
Comprimento Focal	10 mm (0,39in) 42° 17 mm (0,67 in) 24°
Material da estrutura	PCABS com TPE, magnésio
Resolução de IV	320 x 240 (76.800 pixels)
Alinhamento a Laser	A posição é exibida automaticamente na imagem de infravermelho

### APÊNDICE – Memorial de cálculo das potências dissipadas com e sem isolamento térmico

Juntamente com os dados da Tabela 2 e com as Equações 1, 2 e 3, são apresentados os cálculos da potência dissipada por convecção referente às resistências da zona 1. Primeiramente calcula-se o valor de Rayleigh, para ser possível obter o valor de Nusselt e, na sequência, o coeficiente de transferência de calor por convecção:

$$Ra_D = \frac{9,81 * 0,0034(553 - 290)(0,15)^3}{(1,50 * 10^{-5}) * (2,12 * 10^{-5})} = 9,45 * 10^7 \quad (A1)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,6 + \left\{ \frac{0,387(9,45 * 10^7)^{1/6}}{[1 + 0,559/0,71]^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 55,6007 \quad (A2)$$

$$h = \frac{kNu}{D} = 9,45213 \frac{W}{m^2K} \quad (A3)$$

Em seguida é calculada a potência das resistências dissipadas por convecção:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) = 9,45213 * 0,09425(553 - 290) = 234,29 W \quad (A4)$$

Para se obter a potência dissipada das resistências por radiação, utiliza-se os dados da Tabela 1, juntamente com a Equação 4:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) = 0,40 * 5,67 * 10^{-8} * 0,09425(553^4 - 290^4) = 184,78 W \quad (A5)$$

Considerando as propriedades do cilindro, o mesmo procedimento de cálculo foi realizado para a parte do cilindro que não possui resistência térmica.

Conforme apresentado anteriormente no balanço energético de um cilindro com isolamento, a potência térmica dissipada por condução através do isolamento térmico é igual ao somatório do calor dissipado por convecção e radiação para o ambiente:

$$q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (A6)$$

Com base nisso, de forma semelhante, apresenta-se os cálculos da potência dissipada por convecção e radiação referente às resistências com o isolamento térmico da zona 1. Para isso, foram utilizados os valores das Tabelas 2, 3, 4 e 5, assim como as Equações 1, 2, 3 e 4:

$$Ra_D = \frac{9,81 * 0,0034(352 - 293)(0,15 + 0,025)^3}{(1,53 * 10^{-5}) * (2,16 * 10^{-5})} = 3,54 * 10^7 \quad (A7)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,6 + \left\{ \frac{0,387(3,21 * 10^7)^{1/6}}{[1 + 0,559/0,71]^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 41,231009 \quad (A8)$$

$$h = \frac{kNu}{D} = 6,064492 \frac{W}{m^2K} \quad (A9)$$

Por fim, calcula-se da mesma maneira a potência das resistências dissipadas por convecção e radiação:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) = 6,064492 * 0,109956(358 - 293) = 43,34 W \quad (A4)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) = 0,75 * 5,67 * 10^{-8} * 0,109956(358^4 - 293^4) = 42,34 W \quad (A5)$$