

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

**GIULIA CAVICHIOLO SALDANHA**

**GESTÃO DE ENERGIA EM UMA NOVA LINHA DE PRODUÇÃO: PROPOSTA E  
AVALIAÇÃO DE MODELO QUE UTILIZA SIMULAÇÃO DISCRETA PARA  
REDUÇÃO EM GASTOS ENERGÉTICOS**

**CURITIBA**

**2017**

**GIULIA CAVICHIOLO SALDANHA**

**GESTÃO DE ENERGIA EM UMA NOVA LINHA DE PRODUÇÃO: PROPOSTA E  
AVALIAÇÃO DE MODELO QUE UTILIZA SIMULAÇÃO DISCRETA PARA  
REDUÇÃO EM GASTOS ENERGÉTICOS**

Dissertação de Mestrado em Engenharia  
de Produção e Sistemas da Pontifícia  
Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Eduardo  
Gouvêa da Costa  
Coorientador: Prof. Dr. Edson Pinheiro de  
Lima

**CURITIBA**

**2017**

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central

S162g  
2017

Saldanha, Giulia Cavichiolo  
Gestão de energia em uma nova linha de produção: proposta e avaliação de modelo que utiliza simulação discreta para redução em gastos energéticos / Giulia Cavichiolo Saldanha ; orientador, Sérgio Eduardo Gouvêa da Costa ; coorientador, Edson Pinheiro de Lima. -- 2017  
163 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017.  
Inclui bibliografias

1. Energia – Consumo. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Energia elétrica - Produção. 4. Recursos energéticos. 5. Software – Desenvolvimento. 6. Simulação (Computadores). I. Costa, Sérgio Eduardo Gouvêa. II. Lima, Edson Pinheiro de. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. IV. Título.

CDD 20. ed. – 333.793213

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

## **Giulia Cavichiolo Saldanha**

### **GESTÃO DE ENERGIA EM UMA NOVA LINHA DE PRODUÇÃO: PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE MODELO QUE UTILIZA SIMULAÇÃO DISCRETA PARA REDUÇÃO EM GASTOS ENERGÉTICOS.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Presidente da Banca  
Prof. Dr. Sergio Eduardo Gouvêa da Costa  
(Orientador)

Prof. Dr. Edson Pinheiro de Lima  
(Coorientador)

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures  
(Membro Interno)

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures  
(Membro Interno)

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen  
(Membro Externo)

**Curitiba, 29 de março de 2017.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Fundação Araucária pelo fomento que possibilitou que esse mestrado possa ter sido realizado.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Sérgio Eduardo Gouvêa de Costa e meu coorientador Professor Doutor Edson Pinheiro de Lima pelo apoio e pelos ensinamentos durante esse período, e à PUC Paraná pela oportunidade gerada.

Agradeço aos meus colegas mestrandos e doutorandos, com os quais eu pude contar nos trabalhos em conjunto nas matérias, para sanar as dúvidas no decorrer do mestrado, e à amizade e suporte que tivemos uns nos outros.

Agradeço aos meus amigos que aguentaram os momentos que eu duvidava de mim mesma, e sempre estiveram dispostos a me escutar e a me apoiar.

Por fim, agradeço aos meus familiares por todo o apoio emocional durante meus períodos de crise e incertezas. Agradeço especialmente à minha mãe, Carla, que mesmo nos momentos de desespero nunca me deixou duvidar da minha capacidade, e esteve sempre comigo me ajudando.

## RESUMO

A falta de energia atinge escala global e isso decorre do fato de, com exceção das hidrelétricas, boa parte de sua produção depender de fontes não renováveis. Quanto menor a quantidade oferecida de energia, mais cara ela se torna, impactando nos meios dela dependentes como, por exemplo, a indústria. Levando-se isso em conta, surge a necessidade de buscar ações que tornem a indústria, como um todo, mais eficiente quando se trata de energia. Quando o foco passa a ser os processos com maior utilização de energia, como a manufatura, o problema apresenta-se ainda mais crítico. Existem diversos modelos na literatura que propõem melhorias na gestão de energia em linhas de produção já existentes, porém, pouco vem sendo estudado a respeito de como fazer uma nova linha de produção ser instalada com um grau mais aperfeiçoado de eficiência energética. O objetivo do trabalho de dissertação é propor um modelo que utiliza como ferramenta a simulação discreta para a redução do consumo de energia em uma nova linha de produtos. A simulação tem como característica a possibilidade de reproduzir a realidade em um ambiente computacional, onde é possível realizar testes e alterações em uma linha de produção, sem realmente alterá-la. Por essa razão, a simulação foi escolhida como ferramenta de apoio para o caso em que o modelo foi aplicado: uma nova linha de usinagem dentro de uma indústria automobilística na região metropolitana de Curitiba. O modelo proposto possui a característica de avaliar como a linha de produção opera atualmente e possibilita uma simulação fiel do que será a linha futura, viabilizando a realização de cálculos de custo energético nessa nova linha. Com esse modelo estabelecido, foram realizados testes no software de simulação para verificar sua aplicabilidade nos cenários investigados, assim como realizar uma análise dos resultados. Os resultados apresentados pela pesquisa demonstram que entre os nove cenários testados, três deles podem ser utilizados em épocas de menor produção, acarretando num menor gasto de energia. Já nos cenários que estudam a circulação exclusiva de um tipo de peça na linha, somente a circulação de determinada peça sozinha gera economia de energia.

**Palavras-chave:** Gestão de energia. Simulação. Novos projetos

## ABSTRACT

The lack of energy reaches a global scale and it is due to the fact that, with the exception of hydroelectric plants, much of its production depends on non-renewable sources. The smaller the amount of energy supplied, the more expensive it becomes, impacting the areas that depend on it, for example, industries. Taking this into account, the need to pursue actions that make the industry as a whole more efficient when it comes to energy arises. When the focus shifts to the processes with more intensive use of energy, the problem is even more critical. There are several models in the literature proposing improvements in existing lines, but little has been studied about how to make the project of a new line to be installed with an improved level of energy efficiency. The aim of this work is to define a model that uses simulation to reduce energy consumption in a new production line. The simulation is characterized by the ability to create a model that mimics reality in a computing environment where it is possible to perform tests and changes to a production line without really changing it. So, the simulation was chosen as a support tool for the study held in a new machining line, within an automotive industry located in the metropolitan region of Curitiba. The proposed model has the characteristic of evaluating how the production line currently operates and creates a faithful simulation of what will be the future line, making it possible to perform energy calculations in this new line. With this model established, tests were carried out in the simulation software to verify its applicability in the scenarios investigated, as well as perform an analysis of the results. The results presented by the research show that among the nine scenarios tested, three of them can be used in times of lower production, resulting in lower energy expenditure. In scenarios that study the circulation of exclusively one type of part in the line, only the circulation of a certain part alone generates energy savings.

**Keywords:** Energy efficiency. Simulation. New projects.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura do trabalho.....	24
Figura 2 – Medidas e índices para performance em eficiência de energia.....	29
Figura 3 - Contribuição da eficiência de energia aos três aspectos centrais da manufatura sustentável .....	30
Figura 4 - Exemplo de meios técnicos de aumento da eficiência de energia .....	31
Figura 5 - Modelo de aplicação de projeto de simulação .....	56
Figura 6 - Modelo para gestão energética em um projeto futuro .....	62
Figura 7 - Simulação da linha atual .....	64
Figura 8 - Simulação da linha futura.....	65
Figura 9 - Simulação da linha futura.....	65
Figura 10 - Simulação da linha futura no Plant Simulation .....	67
Figura 11 - Planilha de parâmetros .....	67
Figura 12 - Utilização de máquinas no cenário 1.....	69
Figura 13 - Gasto energético das máquinas no cenário 1 .....	70
Figura 14 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 1 .....	70
Figura 15 - Utilização de máquinas no cenário 2.....	72
Figura 16 - Gasto energético das máquinas no cenário 2 .....	72
Figura 17 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 2 .....	73
Figura 18 - Utilização de máquinas no cenário 3 .....	74
Figura 19 - Gasto energético das máquinas no cenário 3 .....	74
Figura 20 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 3.....	75
Figura 21 - Utilização de máquinas no cenário 4.....	76
Figura 22 - Gasto energético das máquinas no cenário 4 .....	76
Figura 23 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 4 .....	77
Figura 24 - Utilização de máquinas no cenário 5.....	78
Figura 25 - Gasto energético das máquinas no cenário 5 .....	78
Figura 26 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 5 .....	79
Figura 27 - Utilização de máquinas no cenário 6.....	80
Figura 28 - Gasto energético das máquinas no cenário .....	80
Figura 29 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 6 .....	81
Figura 30 - Utilização de máquinas no cenário 7.....	82
Figura 31- Gasto energético das máquinas no cenário 7 .....	82

Figura 32 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 7 .....	83
Figura 33 - Utilização de máquinas no cenário 8 .....	84
Figura 34 - Gasto energético das máquinas no cenário 8 .....	84
Figura 35 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 8 .....	85
Figura 36 - Utilização de máquinas no cenário 9 .....	86
Figura 37 - Gasto energético das máquinas no cenário 9 .....	86
Figura 38 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 9 .....	87
Quadro 1 - Benefícios não energéticos da melhoria de eficiência .....	37
Quadro 2 - Elementos necessários para elaboração de uma simulação .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Plano de Publicações.....	23
Tabela 2 - Protocolo de pesquisa para a revisão bibliográfica .....	39
Tabela 3 - Barreiras.....	40
Tabela 4 - Políticas e melhores práticas.....	40
Tabela 5 – Aplicação de estudos em eficiência energética em diversos países .....	41
Tabela 6 - Estudos com DEA .....	42
Tabela 7 – Algoritmos para melhorar o uso de energia.....	43
Tabela 8 - Modelos para melhorar a eficiência energética .....	43
Tabela 9 - Métodos e abordagens.....	45
Tabela 10 - Modelos propostos em processos de usinagem .....	46
Tabela 11 - Melhorias técnicas em máquinas .....	46
Tabela 12 - Consumo total de energia por cenário.....	88
Tabela 13 - Cenário 1 X Cenário 2.....	90
Tabela 14 - Cenário 1 X Cenário 3.....	91
Tabela 15 - Cenário 1 X Cenário 4.....	92
Tabela 16 - Cenário 1 X Cenário 5.....	93
Tabela 17 - Cenário 1 X Cenário 6.....	94
Tabela 18 - Cenário 1 X Cenário 7.....	95
Tabela 19 - Cenário 1 X Cenário 9.....	96
Tabela 20 - Diferenças entre os cenários.....	97

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) .....	71
Equação (2) .....	71
Equação_(3) .....	73
Equação_(4) .....	75
Equação_(5) .....	77
Equação_(6) .....	79
Equação_(7) .....	81
Equação_(8) .....	83
Equação_(9) .....	87
Equação_(10) .....	90
Equação_(11) .....	90
Equação_(12) .....	91
Equação_(13) .....	91
Equação_(14) .....	92
Equação_(15) .....	92
Equação_(16) .....	93
Equação_(17) .....	93
Equação_(18) .....	94
Equação_(19) .....	94
Equação_(20) .....	95
Equação_(21) .....	95
Equação_(22) .....	96
Equação_(23) .....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	<i>Automatic Guided Vehicles</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
ed.	Edição
EEMs	<i>Energy Efficiency Measures</i>
EJ	Exajoule
et al.	E outros / e outras
f.	Folha
ICPR	<i>International Conference of Production Research</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISBN	<i>International Standard Book Number</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Kg	Quilograma
kW	QuiloWatt
kWh	QuiloWatt hora
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MW	MegaWatts
n.	Número
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
OP	Operação
p.	Página
PDCA	Plan, Do, Control, Act
POMS	<i>Production and Operations Management Society</i>
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
RO	Rendimento Operacional
SED	Simulação de eventos discretos
SIBI	Sistema Integrado de Bibliotecas
SPRU	<i>Science and Technology Policy Research</i>
v.	Volume



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	OBJETIVOS .....	21
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>21</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>21</b>
1.4	DEFINIÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	21
1.5	PLANO DE PUBLICAÇÕES .....	23
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>25</b>
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Definição</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Barreiras de implementação</b> .....	<b>34</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Vantagens e desvantagens</b> .....	<b>36</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Modelos identificados na literatura</b> .....	<b>38</b>
2.1.4.1	Revisão sistemática de literatura .....	38
2.1.4.2	Análise dos modelos.....	39
<b>2.1.5</b>	<b>Eficiência Energética na Usinagem</b> .....	<b>47</b>
<b>2.1.6</b>	<b>Simulação na eficiência energética</b> .....	<b>49</b>
2.2	SINTESE DO CAPÍTULO .....	51
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
3.1	SIMULAÇÃO .....	53
3.2	PROJETO DE SIMULAÇÃO.....	55
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE MODELO</b> .....	<b>58</b>
4.1	MODELO PROPOSTO .....	58
<b>4.1.1</b>	<b>Referências de modelos</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Proposta de modelo</b> .....	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>63</b>
5.1	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO .....	68
<b>5.1.1</b>	<b>Cenário 1</b> .....	<b>69</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Cenário 2</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Cenário 3</b> .....	<b>73</b>

5.1.4	Cenário 4.....	75
5.1.5	Cenário 5.....	77
5.1.6	Cenário 6.....	79
5.1.7	Cenário 7.....	81
5.1.8	Cenário 8.....	83
5.1.9	Cenário 9.....	85
6	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>88</b>
6.1	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 2.....	89
6.2	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 3.....	91
6.3	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 4.....	92
6.4	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 5.....	93
6.5	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 6.....	94
6.6	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 7.....	95
6.7	CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 9.....	96
6.8	SÍNTESE DA ANÁLISE.....	97
6.8.1	<b>Situação 1 – A demanda pela peça A é maior</b> .....	<b>97</b>
6.8.2	<b>Situação 2 – A demanda pela peça B é maior</b> .....	<b>98</b>
6.8.3	<b>Situação 3 – A demanda da linha é menor</b> .....	<b>98</b>
6.8.4	<b>Situação 4 – A demanda da linha é maior</b> .....	<b>98</b>
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>99</b>
7.1	RESGATE DOS OBJETIVOS .....	100
7.2	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA .....	101
7.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	101
7.4	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A – REFERÊNCIAS CITADAS NA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA</b> .....	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE B – ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - POMS</b> .....	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE C – ARTIGO COM PROPOSTA DE MODELO PRELIMINAR – ICPR AMERICAS</b> .....	<b>128</b>
	<b>APÊNDICE D – ARTIGO SUBMETIDO AO PERIÓDICO ENERGY EFFICIENCY</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE E – SIMULAÇÃO NO WITNESS</b> .....	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE F – PLANILHA DE PARÂMETROS</b> .....	<b>162</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A falta de energia atinge escala global e isso decorre do fato de, com exceção das usinas hidrelétricas, boa parte da produção de energia depende de fontes não renováveis. Como acontece na lei da oferta e da procura, quanto menor a quantidade oferecida de energia, mais cara ela se torna, impactando nos meios dela dependentes como, por exemplo, a indústria. Por isso, é importante que as indústrias se tornem mais eficientes em termos energéticos, em prol tanto de sua competitividade quanto do ambiente global (VIKHOREV et al., 2013).

A manufatura industrial é uma das principais atividades econômicas da atualidade e esta demanda grande quantidade de energia, pois, necessita transformar e criar produtos utilizando-a. No mundo, o setor industrial consumiu cerca de 98 exajoules (EJ) em 2008, o que representou 28% do consumo total de energia (CARVALHO, 2015). Por essa razão, a busca de formas para reduzir os gastos é vital para a sustentabilidade econômica das empresas.

Levando-se isso em consideração, surgem áreas de estudo, como a de eficiência energética, que procuram formas de otimizar a utilização da energia dentro do meio em que ela está sendo utilizada. Vários autores vêm estudando esse tema e propondo modelos para sua aplicação, visando à menor utilização possível de energia, sem que isso impacte na produção.

Para Patterson (1996), eficiência energética é um termo genérico e não há uma medida quantitativa de "eficiência energética" que não seja equivocada. Na realidade, segundo o autor, uma série de indicadores devem ser levados em conta na quantificação de mudanças na eficiência energética. Em termos gerais, a eficiência energética refere-se à utilização de menos energia para a produção da mesma quantidade de serviços ou de saída útil. No setor industrial, por exemplo, a eficiência energética pode ser entendida como a medida da quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de determinado produto (PATTERSON, 1996).

Tendo isso em vista, o presente trabalho tem como objetivo pesquisar metodologias aplicadas em diferentes áreas da indústria, na literatura, em referências bibliográficas do tema, com objetivo de propor um novo modelo que visa melhorar a eficiência energética de linhas de produção na indústria, com viés em projetos que ainda serão implantados.

A ferramenta utilizada para a realização dos testes do uso de energia é um software de simulação, que permite que cenários sejam verificados num ambiente computacional, para perceber os impactos gerados sem ter que afetar a linha real de produção.

## 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A grande demanda de energia proveniente de economias emergentes colabora para que ela se torne cada vez mais escassa, levando os governos a buscar diversas formas para gerar energia a fim de suprir suas necessidades. Muitas vezes, o combustível fóssil é utilizado para perfazer a necessidade, o que gera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e conseqüentemente, alterações climáticas. Por essa razão, a atenção voltada às políticas e questões relacionadas à eficiência energética industrial vem sendo renovada. Essa área é considerada uma das maneiras principais de reduzir essa ameaça, pois há um grande potencial inexplorado para a eficiência energética na indústria (MUKHERJEE, 2008; JAFFE e STAVINS, 1994).

Segundo o que afirmam Worrel et al. (2009), a gestão de energia industrial é indicada por desempenhar um papel determinante, a fim de que a indústria venha a se tornar menos carbono-intensiva. Além disso, a temática eficiência energética contribui para a redução do uso de energia, gerando mais segurança energética (TANAKA, 2008).

Em seu artigo, Abdelaziz et al. (2011) definem que:

A energia é uma necessidade básica para diferentes propósitos em instalações industriais ao redor do mundo. Uma enorme quantidade de energia é necessária para os países com crescimento econômico mais rápido. A energia é, portanto, um fator crucial para a competitividade da economia e para geração de empregos. No entanto, as necessidades energéticas e a população global estão aumentando em proporções similares. Esta preocupação deve ser tratada pela comunidade internacional para superar qualquer escassez de recursos energéticos no futuro.

O consenso geral nos estudos da área destaca que há um aumento de pesquisas sobre eficiência energética. Porém, levando-se em conta que há também um aumento no consumo de energia, faz-se necessário que mais desses projetos sejam realizados (MUKHERJEE, 2008).

Estudos afirmam que existe uma série de barreiras que inibem a adoção de medidas de eficiência energética rentáveis (SARDIANOU, 2008), as quais podem ser

“estruturais”, referentes às políticas regulamentares e fiscais do governo, alterações dos preços de combustível ou “comportamentais”, referentes, entre outras razões, às tomadas de decisão, aos riscos dos investimentos em eficiência energética e à falta de informação. Apesar de existir a necessidade de eficiência energética industrial, esses estudos indicam que se observam falhas no aproveitamento das vantagens advindas das oportunidades de medidas realizadas em direção à conservação de energia eficiente, em relação ao custo da energia. Essas medidas nem sempre são implementadas, resultando em um *gap* – lacuna – entre os níveis reais e ótimos de eficiência energética (HIRST e BROWN, 1990).

As indústrias visam sempre ao lucro e à instrumentos políticos, tais como os impostos sobre a energia e as emissões de carbono, os quais geram benefícios econômicos diretos para as empresas que apresentam maior gestão da energia. Porém, a tarefa de promover a eficiência energética é difícil e impedida por muitas restrições, algumas de natureza política. Por isso, se o objetivo é conseguir grandes melhorias na eficiência energética, vários instrumentos políticos diferentes devem ser utilizados, entre eles as informações sobre o gerenciamento de energia e apoio financeiro para o desenvolvimento da gestão de energia (CHRISTOFFERSEN et al., 2006).

Existe ainda o problema na gestão de energia não ser totalmente priorizada, mesmo em grandes indústrias que utilizam a energia de maneira intensa. Esse problema é ainda maior em empresas menores que, embora não usem tanta energia, tampouco investem em sua gestão. (THOLLANDER e OTTOSSON, 2010).

O sistema de gestão de energia é semelhante a outros sistemas de gestão, tais como: a gestão ambiental, a gestão de saúde, de segurança, de qualidade e a gestão da produção. Assim como para os outros sistemas de gestão, há uma norma regulamentadora para a gestão energética, a ISO 50001 (Norma Internacional para Sistemas de Gestão de Energia). O conjunto dessas normas de gestão pertencem à família dos chamados modelos racionais para a tomada de decisão (CHRISTOFFERSEN et al., 2006).

O controle e o monitoramento também são questões nas quais a empresa deve investir, pois quando se mostram insuficientes, podem resultar na falta de percepção do real potencial para investimentos rentáveis em energia. Contudo, mesmo que exista um controle eficaz, os gestores podem ainda ter dificuldades na avaliação do impacto e efeitos decorrentes das medidas de melhoria da eficiência energética, por

causa da falta de conceitos adequados de avaliação. Por essas razões, os modelos para melhoria em eficiência energética são desenvolvidos (BUNSE et al., 2011).

Energia é um dos muitos fluxos de recursos em uma manufatura (BALL et al., 2009). Quando comparada ao fluxo de produção e da redução dos estoques, a redução do fluxo de energia vem recebendo a menor atenção nas empresas. Uma série de fatores acarreta isso, incluindo: o baixo custo, a falta de medição, a falta de responsáveis pela medição, entre outros (BALL, 2015).

O governo brasileiro tem como objetivo deixar de consumir 10% de energia até o ano de 2030. Porém, quando se observa quanto esse valor representa nas economias históricas realizadas, percebe-se que esse valor é ambicioso e é preciso tomar medidas agora se o Brasil almeja, de fato, bater esta meta. (MME, 2014; OLIVEIRA et al., 2013)

A capacidade de produção de energia elétrica aumentou no ano de 2014, chegando a 7.171 MW. O setor industrial gastou menos 2% de energia, comparado ao ano anterior, porém, isso ainda representa um consumo anual de 87.502 KW, representando 32,9% do seu consumo do Brasil (MME, 2015).

Os principais obstáculos para o combate ao desperdício de energia no Brasil são as barreiras encontradas para implementação de eficiência energética, a saber: tecnologia; custo inicial; falta de informação; cultura; medidas legais/Institucionais; falta de financiamento; mercado; falta de treinamento; equipamento; descentralização; e conflito de interesses entre as concessionárias e os consumidores (OLIVEIRA et al., 2013).

Analisando-se o contexto mundial e especialmente o do Brasil, verifica-se que há espaço para o estudo da eficiência energética na área industrial, levando-se em conta o consumo considerável da mesma. Quando se planejam novos projetos, já antevendo que estes sejam mais eficientes em gasto energético, é necessário buscar formas para testar essa aplicação. E uma das formas possíveis de fazê-lo é por meio do uso de softwares de simulação discreta, no qual é possível simular possíveis cenários e verificar o impacto que esses geram em termos de energia.

É gerada, então, a questão-problema, que guiará este trabalho de pesquisa: “Como o uso de simulação discreta pode ajudar na gestão do consumo de energia em uma linha nova de produção?”.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Um programa de energia industrial visa a reduzir barreiras que impeçam a eficiência energética. Por essa razão, é de extrema importância detectar as barreiras que restringem os mercados para as tecnologias de maior eficiência energética, a fim de efetivamente reduzi-las (THOLLANDER e DOTZAUER, 2010).

Em relação às questões políticas envolvendo a importância do estudo da eficiência energética, Mukherjee (2008) define:

Melhorar a eficiência energética é importante a partir de várias perspectivas políticas. Um objetivo muito importante é conservar a energia derivada de combustíveis fósseis para evitar seu esgotamento no futuro próximo. Melhorar a eficiência energética também vai reforçar a segurança energética da nação. Além disso, a redução no uso de energia, especialmente da queima de combustíveis fósseis é essencial para evitar a deterioração da qualidade ambiental. Outro objetivo para alcançar a eficiência energética é impulsionado pelo objetivo econômico subjacente de minimização de custos. Do ponto de vista custo-eficácia é muito importante para reduzir o uso de energia durante períodos de altos preços da energia e também para substituir adequadamente outros insumos para a energia.

Do ponto de vista do negócio, uma maior eficiência energética é de grande importância; esta gera benefícios econômicos diretos, além de um aumento na competitividade e maior produtividade (WORRELL et al., 2003; KANNAN e BOIE, 2003).

E a gestão de energia é uma forma eficaz de monitorar o gasto energético, maximizar os lucros e melhorar posições competitivas, por meio de medidas organizacionais e otimização da eficiência energética. Além disso, é um processo dinâmico que gera novos conhecimentos, promovendo ganhos em eficiência (KANNAN e BOIE, 2003). Ademais, a área de gestão da energia precisa ser focada, pois a integração da eficiência energética com a gestão da produção é uma alavanca importante para melhorar os sistemas de produção, deixando-os adequados para programas de eficiência energética, uma vez que pode ser a base para a implementação com sucesso de medidas de melhoria (BUNSE et al., 2011).

Para tanto, existe uma necessidade de utilização de indicadores de energia na indústria, pois, estes geram um entendimento das principais influências tecnoeconômicas sobre o consumo total de energia final na indústria. A sua análise também é um fator que pode ajudar a relacionar as alterações do consumo de energia para políticas de eficiência energética ou políticas ambientais, mudanças nos preços

de energia e mudanças no comércio exterior de produtos intermediários ou finais. Ainda, esses indicadores são um instrumento importante para medir o êxito dos controles de emissões de CO<sub>2</sub>. Há uma grande necessidade para o campo de indicadores de energia, especialmente no setor industrial (EICHHAMMER, 1997).

Segundo Abdelaziz et al. (2011), na indústria, a eficiência de energia pode ser melhorada por meio de três abordagens distintas, sendo elas: a economia de energia pela administração, a economia de energia por meio de tecnologias e, por fim, a economia de energia pela aplicação de regulamentações. Focando principalmente na questão tecnológica, esta apresenta um grande potencial para a redução do gasto de energia nas indústrias.

Quando o foco é o Brasil, os desafios enfrentados no setor energético apontam para o papel crucial das tecnologias e das políticas de tecnologia para encontrar, transformar e utilizar os recursos de energia de forma eficiente, rentável e ambientalmente saudável (JANNUZZI, 2005).

O mercado tornou-se um dos focos fundamentais do modelo implementado no setor elétrico brasileiro. As dificuldades para a sua consolidação devem-se, não apenas ao fato de se depender quase que unicamente de uma base hídrica, mas também às previsões impossíveis de eficiência econômica para a competição e expansão pela intervenção do setor privado. Além disso, as novas partes interessadas não expandiram o sistema de abastecimento de acordo com o ritmo do crescimento da demanda, devido às incertezas em relação ao retorno dos investimentos e à operação do mercado (PAZ et al, 2007).

Por conseguinte, identificam-se razões que evidenciam a importância de pesquisas relacionadas à eficiência energética, especialmente aplicada em grandes indústrias de grande consumo de energia.

Na literatura, há muitos estudos voltados à melhoria do uso de energia em operação e alguns trabalhos focados em utilizar a simulação como ferramenta para aprimorar a eficiência energética. Gomes (2015) simula linhas de manufatura em operação para fazer a análise de como certas mudanças podem gerar impacto no consumo de energia.

O foco deste trabalho é utilizar um software de simulação discreta como apoio para análise de novos projetos de manufatura, simulando cenários e verificando os impactos gerados em termos energéticos. Com essas informações, podem ser criados planos de ação, permitindo o uso mais eficaz da energia na linha implantada.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

A partir do problema definido para a pesquisa, define-se o objetivo para a dissertação que é propor um novo modelo que utiliza simulação discreta para avaliar o consumo de energia em uma nova linha de usinagem de produtos.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral do trabalho, é possível dividi-lo em objetivos específicos, os quais podem ser verificados abaixo:

- a) Identificar na literatura os modelos utilizados em eficiência energética.
- b) Propor um modelo que tenha como ferramenta um software de simulação, e que permita avaliar o uso de energia numa linha de produção;
- c) Realizar os experimentos com o apoio de simulação do modelo proposto;
- d) Analisar os dados de gastos energéticos gerados pela simulação para a elaboração do relatório final.

## 1.4 DEFINIÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA

Segundo Lakatos e Marconi (2011) “não há ciência sem o emprego de métodos científicos”. Conceitualmente, método é a ordem imposta aos diversos processos que objetivam alcançar um determinado fim ou resultado (CERVO e BERVIAN, 1983).

São várias as classificações da pesquisa. Quanto à sua natureza, esta pode ser aplicada ou básica (GIL, 2002). Esta pesquisa de dissertação pode ser classificada como aplicada, pois tem como finalidade criar conhecimentos úteis que possam ser replicados por outros pesquisadores.

Quanto aos seus objetivos, a pesquisa pode ser exploratória, descritiva ou experimental/explicativa (LAKATOS e MARCONI, 2001). A pesquisa exploratória formula problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para que sejam efetuados estudos posteriores. Esse tipo de pesquisa tem o objetivo de proporcionar

uma visão geral, uma primeira aproximação com o problema. Já a pesquisa descritiva descreve as características de uma determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Uma das características mais significativas desse tipo de pesquisa é o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados (GIL, 2002). E, por fim, a pesquisa explicativa ou experimental, a qual visa estabelecer relações de causa-efeito por meio da manipulação direta das variáveis relativas ao objeto de estudo, buscando identificar as causas do fenômeno (CERVO e BERVIAN,1983).

Quanto ao seu objetivo, esta pesquisa classifica-se como descritiva no uso de simulação em que a autora alimenta dados num software e identifica os resultados gerados nos diferentes cenários propostos.

Na classificação abordagem do problema, a pesquisa pode ser quantitativa ou qualitativa. A abordagem quantitativa envolve o ato de mensurar variáveis. As principais etapas para esse tipo de pesquisa envolvem desenvolver uma teoria, formular a hipótese, coletar os dados, analisar os dados e apresentar os resultados. Os métodos de pesquisa quantitativa mais utilizados para a Engenharia de Produção são: pesquisa de avaliação ou *survey*; modelagem/simulação; experimento e quase experimento. Na abordagem quantitativa, o foco da pesquisa recai sobre o contexto do local, os indivíduos e a interpretação da realidade subjetiva inerente a eles. Na pesquisa qualitativa voltada à Engenharia de Produção, o pesquisador efetua a pesquisa dentro da organização, coleta evidências e faz observações (MARTINS, 2012).

Em relação à abordagem do problema, a pesquisa feita foi quantitativa, pois foi feita uma análise quantitativa.

Com relação aos métodos de pesquisa, particularmente, na Engenharia de Produção os mais frequentes são *survey*, estudo de caso, modelagem, simulação, estudo de campo ou experimento (NAKANO, 2012).

A metodologia empregada no projeto foi de modelagem/simulação, por meio da manipulação das variáveis com a utilização de computadores.

Para a aplicação do projeto de simulação foi selecionada uma linha de usinagem de uma empresa automotiva na localidade de Curitiba. A escolha deu-se por conveniência, devido ao fato da pesquisadora trabalhar neste local.

## 1.5 PLANO DE PUBLICAÇÕES

O plano de publicações definido para a dissertação pode ser verificado na Tabela 1, abaixo.

O primeiro artigo apresenta uma revisão sistemática de literatura, focando em *frameworks* utilizados para eficiência energética e foi apresentado no Congresso POMS (*Production and Operations Management Society*) de 2016, realizado em Orlando. O segundo artigo, apresentou a primeira proposta de modelo e foi apresentado no congresso ICPR Americas, realizado no Chile em outubro de 2016. O modelo finalizado, após as alterações realizadas por meio de um refinamento será enviado para um periódico a ser definido. Além disso, o último artigo, que engloba todo o assunto da dissertação foi submetido ao periódico *Energy Efficiency*.

Tabela 1 - Plano de Publicações

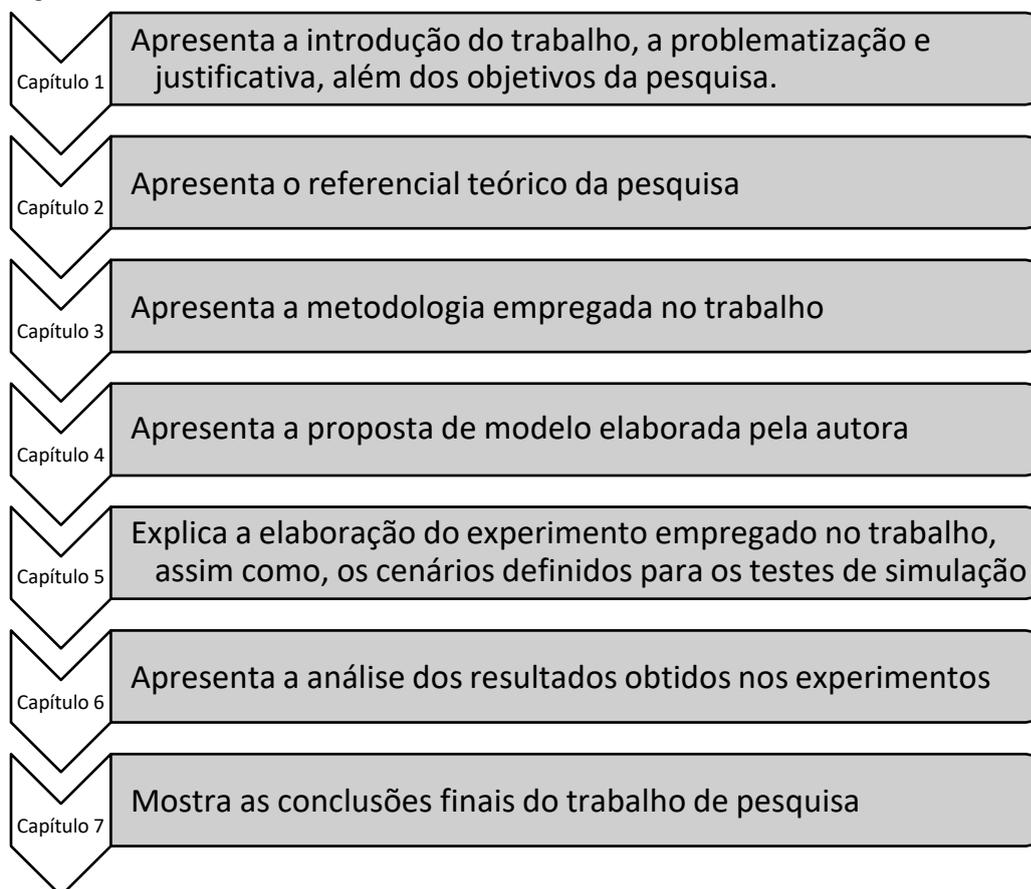
Plano de Publicações				
Artigo	Submissão	Publicação	Status	
<b>Artigo 1</b> – Revisão Bibliográfica	Congresso Internacional	POMS - Orlando	Apresentado	Apêndice B
<b>Artigo 2A</b> – Proposta do Novo Modelo	Congresso Internacional	ICPR Américas - Chile	Apresentado	Apêndice C
<b>Artigo 2B</b> – Proposta de modelo após correções	Periódico Internacional	A ser decidido	A ser submetido	
<b>Artigo 3</b> – Modelo testado	Periódico Internacional	<i>Energy Efficiency</i>	Submetido	Apêndice D

Fonte: a autora, 2017.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho de dissertação foi organizado conforme diagrama da Figura 1:

Figura 1 - Estrutura do trabalho



Fonte: a autora, 2017.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Silva e Menezes (2005) afirmam que na elaboração de uma revisão de literatura, recomenda-se a metodologia da pesquisa bibliográfica, a qual envolve a análise do que está publicado em artigos, revistas, livros, publicações avulsas, entre outras, a fim de que seja identificada a situação do tema a ser pesquisado, conhecer os aspectos já abordados em pesquisas anteriores e verificar possíveis abordagens e opiniões similares e distintas à da presente pesquisa.

Tendo em vista que a presente pesquisa objetiva definir um novo modelo utilizando-se ferramentas para a redução nos gastos de energia elétrica em uma linha de alto consumo de energia como as linhas de usinagem, faz-se necessária uma revisão da literatura voltada aos *frameworks* de eficiência energética.

Consequentemente, é necessário verificar o que é apresentado na literatura sobre o tema eficiência energética, suas definições, os *gaps* e as barreiras para sua implementação, as vantagens e as desvantagens de sua adoção e, por fim, apresentar os modelos de implantação encontrados na literatura.

### 2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A seção de referencial teórico que irá falar sobre eficiência energética está dividida em cinco subseções. A primeira apresenta definições de eficiência energética e gestão de energia. A seção seguinte explica as barreiras que impedem a área de ser implantada de forma eficaz nas empresas. A próxima seção analisa algumas vantagens e desvantagens da área. A quarta seção engloba os modelos que foram encontrados na revisão sistemática da literatura realizada pela autora, e uma breve descrição dos mesmos. Por fim, a última seção aborda um breve estudo do que é referenciado na literatura de eficiência energética aplicada em linhas de usinagem.

#### 2.1.1 Definição

Define-se eficiência energética pela quantidade de atividade humana (para aquecer um quarto para chegar a uma determinada temperatura, transportar mercadorias a uma certa distância, produzir uma quantidade de aço) fornecida por unidade de energia consumida (MARTIN et al., 1994 apud PHYLIPSEN et al., 1997).

De acordo com Phylipsen et al. (1997), a eficiência energética depende tanto da eficiência técnica, quanto da eficiência operacional e da manutenção.

Para entender eficiência energética, é importante saber que a demanda por energia vem de quatro grandes setores: o residencial, o industrial, o de transporte e do setor formado por prédios comerciais e governamentais, iluminação pública, etc. Particularmente para o setor industrial, os principais fatores que determinam a demanda de energia são: o crescimento da atividade econômica, a população e a composição da indústria (MARTINEZ, 2011).

Espinha dorsal de qualquer país industrializado, o setor de manufatura enfrenta os desafios para acomodar as questões de sustentabilidade. Este setor consome mais energia do que quaisquer outros setores de utilização final, sendo responsável, atualmente, pelo consumo de cerca de 37% da energia fornecida total do mundo. A energia é consumida por um grupo diversificado de indústrias, incluindo o da manufatura, da agricultura, da mineração, da construção em uma vasta gama de atividades, tais como: processamento e montagem, estoque e iluminação (ABDERLAZIZ et al., 2011). Vale aqui destacar que o setor industrial global continua a representar a maior fatia do consumo de energia e ainda vai consumir mais da metade de toda a energia entregue até 2040 (GOPALAKRISHNAN et al., 2014).

Entende-se por manufatura, a transformação de materiais, de energia e de informação em bens para a satisfação das necessidades humanas. Os processos de fabricação utilizam um ou mais mecanismos físicos ou químicos para transformar a forma do material ou as suas propriedades. A energia necessária é considerada como entrada do processo. Essa entrada é apenas parcialmente incorporada ao produto final, sob a forma de trabalho útil; o resto é transformado em calor residual. Os estudos atuais indicam que apenas uma pequena fração do consumo de energia agrega valor ao produto; a maior parte da energia é utilizada para a criação de condições de processo estável e funções periféricas (FYSIKOPOULOS et al., 2014).

E é a atividade industrial, em especial a manufatura, que traz uma grande carga ambiental. Isso ocorre porque a fabricação consome materiais renováveis e não renováveis (por exemplo, metais, materiais derivados de petróleo fóssil e água), bem como, quantidades significativas de energia, resultando em estresse substancial no meio ambiente. Além disso, esse processo libera resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que podem também ser danosos (DUFLOU et al., 2012).

Portanto, é importante que as indústrias tornem-se mais eficientes em termos energéticos, em prol da competitividade e do ambiente global, já que a geração de energia elétrica prejudica o meio ambiente, devido à emissão de gases de efeito estufa, e sofre com o constante aumento no custo dos portadores de energia (VIKHOREV et al., 2013). Com custos de materiais, energia e resíduos subindo, as melhorias na eficiência ambiental trarão maiores benefícios do que nunca. E as indústrias que não melhorarem, sofrerão com custos mais altos na eliminação de resíduos e a não conformidade com a legislação punitiva (BALL et al., 2009).

Para tanto, faz-se premente a implementação de melhoria na eficiência energética, pois esta traduz não só em economia de custos de operação, mas também na melhoria da qualidade de produtos e serviços, vantagem competitiva e aumento do lucro por ação (MILLS et al., 2008).

Quando bem-sucedido, o investimento rentável em eficiência energética cumpre o desafio de manter a produção de produtos de alta qualidade com custos de produção reduzidos. As tecnologias de eficiência energética, muitas vezes incluem "benefícios adicionais", aumentando ainda mais a produtividade de uma empresa (GORDIC et al., 2010). Ademais, as tecnologias industriais inovadoras visam não só à redução do consumo de energia, mas também à melhoria da produtividade, à redução dos custos de capital, à redução dos custos de operação, à melhoria da confiabilidade, bem como, à redução das emissões e à melhoria das condições de trabalho (WORELL e PRINCE, 2001).

Conclui-se que o setor industrial é, portanto, de grande importância para o estudo da melhoria da eficiência energética em níveis mundiais. Segundo o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), a melhoria da eficiência energética industrial é um dos meios mais importantes do mundo para a redução do aquecimento global (IPCC, 2007).

A eficiência energética desempenha um papel importante na redução do consumo de energia fóssil, reduzindo a poluição do ar e amenizando as alterações climáticas. Por isso, vários países formularam estratégias políticas, econômicas e técnicas em todos os setores da economia, com o objetivo de reduzir a demanda de energia (MARTINEZ, 2011). Vale ressaltar que os combustíveis fósseis já vêm alimentando o desenvolvimento industrial e as comodidades da vida moderna desde 1700, gerando efeitos colaterais indesejáveis. A conversão de combustíveis fósseis para energia térmica, por meio da combustão, afeta o meio ambiente e o ar (ÇENGEL,

2011). Contudo, admite-se que avanços enormes foram feitos em eficiência energética desde 1970, contribuindo – junto com mudanças estruturais e comportamentais – para um declínio na intensidade energética (medida da energia utilizada por unidade de atividade) na maioria das nações (MILLS et al., 2008).

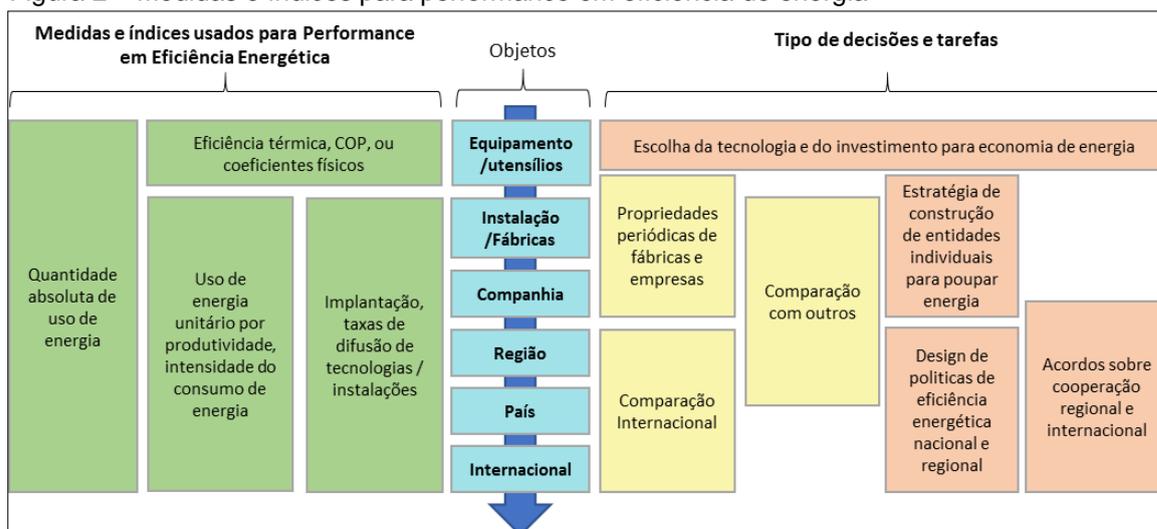
Mas o sucesso das políticas climáticas internacionais depende do quanto as partes envolvidas conseguem chegar a acordos internacionais concretos, visando à redução da emissão de gases de efeito estufa. A melhoria na eficiência energética é considerada uma questão importante para a redução das emissões de gases relacionadas com a energia que geram o efeito de estufa, especialmente quando se consideram as próximas décadas. A fim de apoiar o desenvolvimento dessa política internacional, é necessário dispor de informações adequadas sobre os níveis de eficiência energética e sobre os potenciais e os custos para melhorá-la (PHYLIPSEN et al., 1997)

A eficiência energética vem sendo amplamente reconhecida como um meio muito promissor para enfrentar as questões ambientais. É necessário um forte impulso para a redução do consumo de energia. Isto significa que as políticas futuras devem ser na forma de obter uma maior divulgação das chamadas medidas de eficiência energética (Energy Efficiency Measures - EEMs) em qualquer setor (TRIANNI et al., 2014).

Na indústria, a eficiência de energia pode ser melhorada por meio de três abordagens diferentes. A economia de energia pode ser realizada por meio da gestão, de tecnologias e das políticas e regulamentações (ABDELAZIZ et al., 2011).

Um componente-chave da política energética em alguns países envolve o aumento da eficiência energética e produtividade para garantir o desenvolvimento sustentável. Diferentes pesquisadores desenvolveram indicadores para medir e avaliar o desenvolvimento passado e as futuras perspectivas de desempenho da eficiência energética nos setores econômicos e/ou entre os países ou regiões (MARTINEZ, 2011). A importância de se utilizar medidores de desempenho na eficiência energética é discutida por Tanaka (2008), que apresenta tipos de indicadores que podem ser usados na indústria. Eles se dividem em quatro categorias: a eficiência térmica de energia dos equipamentos, a intensidade do consumo de energia (o consumo de energia da unidade e o consumo específico de energia), a quantidade absoluta do consumo de energia e taxa de difusão de instalações/tipos de equipamentos energeticamente eficientes (Figura 2).

Figura 2 – Medidas e índices para performance em eficiência de energia



Fonte: Tanaka, 2008.

Já para monitorar as alterações na eficiência energética, os indicadores dividem-se em quatro grupos principais, definidos por Patterson (1996):

- termodinâmicos: são indicadores de eficiência energética que dependem inteiramente de medidas derivadas da ciência da termodinâmica. Alguns desses indicadores são razões simples e alguns se referem a medidas mais sofisticadas que estabelecem a relação entre o uso real de energia e um processo considerado “ideal”;
- físico-termodinâmicos: esses são indicadores híbridos, onde a entrada de energia é medida em unidades termodinâmicas, mas a saída é medida em unidades físicas. Essas unidades físicas têm a intenção de medir a prestação de serviços do processo - por exemplo, em termos de toneladas de produtos ou de passageiros por milhas;
- econômico-termodinâmicos: esses são também indicadores híbridos onde a prestação de serviços (saída) do processo é medida em termos de preços de mercado. A entrada de energia, como acontece com a termodinâmica e com os indicadores físico-termodinâmicos, é medida em termos de unidades termodinâmicas convencionais;
- econômicos: esses indicadores medem mudanças na eficiência energética, somente em termos de valores de mercado (\$). Ou seja, tanto a entrada de energia como a prestação de serviços (saída) são avaliados em termos monetários.

Baseando-se Bunse et al. (2011), há também três condutores importantes para a introdução de melhorias na eficiência energética: o aumento nos preços da energia, as novas regulamentações ambientais, os custos associados às emissões de CO<sub>2</sub> e a mudança de comportamento de compra dos clientes para um comportamento mais sustentável e eficiente. Esses condutores fazem da eficiência energética um pilar importante contribuindo para todos os três aspectos (*triple bottom line*), que são considerados nas estruturas de produção sustentável, conforme mostrado na Figura 3:

Figura 3 - Contribuição da eficiência de energia aos três aspectos centrais da manufatura sustentável



Fonte: Bunse et al., 2011.

Como pré-requisito para abordagens bem-sucedidas e a fim de promover a visão de eficiência energética, é necessário estudar o comportamento do consumo de energia. Do ponto de vista da produção de energia, é necessária uma análise mais profunda do equipamento de produção. Como mostram diversos estudos para diferentes tipos de máquinas de produção, o consumo de energia em termos de eletricidade normalmente não se apresenta constante ao longo do tempo, mas, sim altamente dinâmico, dependendo do processo de produção e do estado real da máquina. As máquinas são compostas de vários componentes que consomem energia e que geram um perfil específico de energia na produção (HERRMANN e THIEDE, 2009).

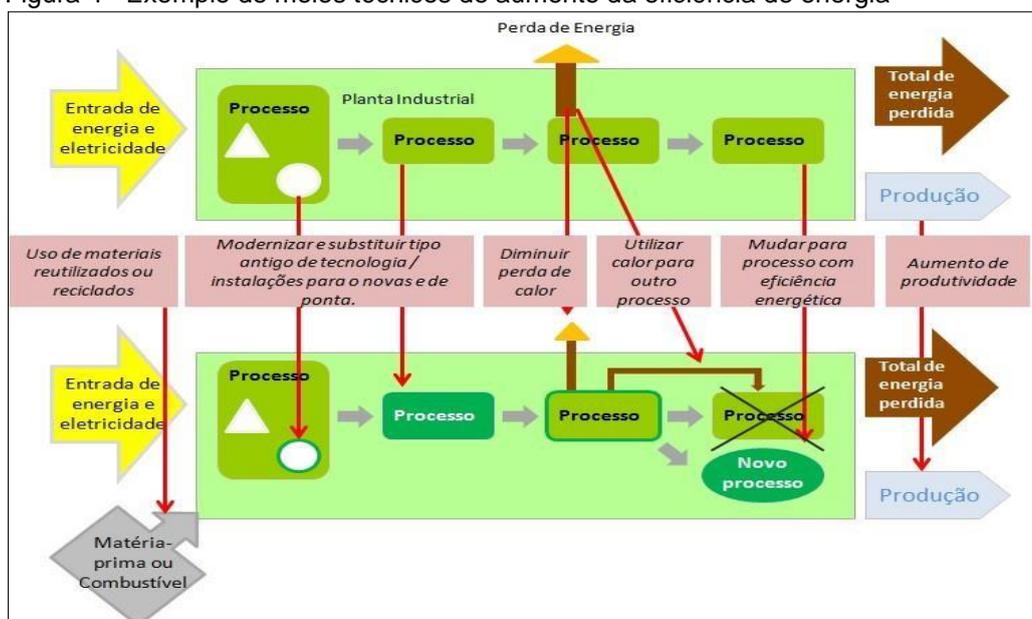
Além disso, a indústria utiliza muita energia e possui um grande potencial para gerar economias e, por isso, é uma área atraente para melhorar a segurança energética por meio da eficiência energética. Entretanto, há muitos desafios inerentes à grande diversidade de políticas existentes. O consumo de energia do setor é influenciado por suas muitas tecnologias, processos e produtos; as fontes e os preços

da energia; as situações política, econômica e de negócios e as prioridades de gestão e tomada de decisões. Além disso, a eficiência energética pode ser melhorada por meio de uma ampla variedade de ações técnicas, conforme apresentado na lista abaixo, elaborada por TANAKA (2011):

- a) Mantendo e reformando equipamentos para conter a degradação de eficiência natural e para refletir mudanças nos parâmetros do processo;
- b) Adaptando ou substituindo equipamentos obsoletos, linhas de processo e equipamentos por novas tecnologias;
- c) Usando o gerenciamento de calor para diminuir a perda de calor e a energia de resíduos como, por exemplo: a utilização adequada de isolamento, a utilização de calor e materiais de outros processos;
- d) Controlando o processo de melhoria, para uma melhor eficiência energética e de materiais, e produtividade do processo geral;
- e) Racionalizando os processos, por meio da eliminação de passos do processamento e da utilização de novos conceitos de produção;
- f) Reutilizando e reciclando produtos e materiais;
- g) Aumentando o processamento de produto, diminuindo as taxas de rejeição e melhorando o rendimento de materiais.

O esquema pode ser observado na Figura 4:

Figura 4 - Exemplo de meios técnicos de aumento da eficiência de energia



Fonte: Tanaka, 2011.

A eficiência energética está associada ao menos desperdício de energia em todas as etapas desde a produção até à utilização final. A eficiência energética é um termo mais amplo que inclui a conservação de energia (ÇENGEL, 2011).

Para se adotar medidas de conservação de energia, é necessário que se conheça as suas classificações. Estas vão desde medidas setoriais, passando por medidas de conservação de energia por meio do uso sistemático de energia não utilizada e conservação de energia por meio de mudanças no comportamento social, até medidas mais amplas que envolvem a cooperação internacional para a promoção da energia com o objetivo de combater o aquecimento global, esforços de cooperação internacional e entre governo-indústria-universidade no desenvolvimento de tecnologias para a conservação de energia e promoção da difusão de informações por meio de publicidade e educação (DINCER, 2003).

Visando à implementação de um plano de estratégia de conservação de energia, seguem os passos básicos estabelecidos por Dincer (2003):

- (a) a definição dos principais objetivos;
- (b) a identificação dos objetivos da comunidade;
- (c) a análise ambiental;
- (d) o aumento da consciência pública;
- (e) a análise da informação;
- (f) o apoio da comunidade;
- (g) a análise das informações, das políticas e das estratégias adotadas;
- (h) o desenvolvimento do plano;
- (i) a implementação de novos programas de ação; e
- (j) a avaliação do sucesso.

Embora saiba-se sobre as medidas e o passo a passo para a implementação da conservação de energia, algumas das razões justificam a falta de programas voltados a ela, a saber:

- a) Razões técnicas (falta de disponibilidade, confiabilidade e conhecimento de tecnologias eficientes);
- b) Razões institucionais (falta de entrada apropriada técnica, apoio financeiro e um projeto adequado de programa e experiência de controle);
- c) Razões financeiras (falta de mecanismos de financiamento);

- d) Razões voltadas à gestão (práticas inadequadas de gestão do programa e de treinamento de pessoal);
- e) Razões de política de preços (preços inadequados de eletricidade e outros produtos energéticos);
- f) Razões de difusão da informação (falta de informação adequada).

Quanto à sua gestão, a energia já não pode ser considerada uma despesa operacional fixa e deve passar a ser tratada como um recurso a ser gerenciado ao lado de materiais, dinheiro e mão de obra (VIKHOREV et al., 2013). Até recentemente, as práticas de gestão de energia consistiam, principalmente, na substituição de equipamentos ineficientes e, em seguida, o uso de qualquer método para estimar o valor que foi poupado. A experiência mostrou que os efeitos positivos da melhoria de eficiência energética diminuíram ao longo do tempo. Por isso, os esforços mudaram para definir padrões e melhores práticas adequadas e implementar o sistema de gestão de energia consistente para aumentar e manter a poupança de energia. O conhecimento adquirido a partir de projetos de eficiência energética está conduzindo a uma transição para as estratégias de gestão de energia propostas e aprovadas por uma série de organizações internacionais (GORDIC et al., 2010).

Entretanto, não se pode gerenciar o que não se mede, de modo que a coleta de dados é fundamental para a gestão de energia. Os dados de energia das indústrias são coletados em todos os níveis de granularidade de nível subprocesso para o setor da indústria global, dependendo da natureza da análise a ser realizada. Em nível do setor da indústria, as organizações como a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA) coletam, analisam e divulgam informações sobre energia. Nas empresas, as organizações realizam auditorias energéticas para entender os fluxos de energia nas instalações, nos sistemas de produção ou processos para, assim, reduzir a quantidade de energia usada sem afetar negativamente a produtividade (VIKHOREV et al., 2013).

A gestão energética e a conservação de energia são comumente usadas alternadamente. A gestão de energia, tal como definido pela norma ISO 50001, está focada na melhoria contínua do desempenho energético que é definido amplamente como resultados mensuráveis relacionados com a eficiência energética, uso e consumo (GOPALAKRISHNAN et al., 2014).

A norma ISO 50001 estabelece quadro de aferição de gestão de energia para instalações industriais, instalações comerciais e organizações inteiras. Com base na

estrutura, as empresas podem desenvolver as metas de eficiência energética, o plano de intervenções, priorizar medidas de eficiência energética e investimentos, monitorar e documentar o desempenho da gestão e resultados energéticos e garantir a continuidade e melhoria constante da eficiência energética (NGAI et al. 2013). A ampla implementação da ISO 50001 (Norma Internacional para Sistemas de Gestão de Energia) aborda a gestão organizacional eficaz do uso de energia e desempenho em relação aos padrões globais, usando uma estrutura comprovada para plantas industriais, a fim de gerenciar todos os aspectos da energia, incluindo sua aquisição e uso (GOPALAKRISHNAN et al., 2014).

De acordo com recentes normas internacionais sobre gestão de energia (ISO-50001), as cláusulas 8e, 8f e 8g de eficiência energética definem as tarefas que deverão ser realizadas pelos departamentos de empresas de gestão de energia, da seguinte forma (ISO 50001, 2011): monitorar e avaliar o consumo de energia e os custos; preparar relatórios periódicos; adquirir e instalar os medidores necessários para o acompanhamento do consumo de energia; acompanhar o relacionamento entre produtos e consumo de energia; e preparar propostas para a redução da intensidade energética da empresa.

### **2.1.2 Barreiras de implementação**

Quando o tema é eficiência energética, entende-se como barreira "um mecanismo postulado que inibe o investimento em tecnologias que sejam eficientes, tanto em termos energéticos, quanto (aparentemente) economicamente eficientes" (*Science and Technology Policy Research - SPRU, 2000*).

Políticas e programas do setor industrial são projetados para lidar com uma série de barreiras ao investimento em eficiência energética e opções de redução de emissões de gases de efeito estufa, incluindo a disposição de investir, os custos de informação e transação, as barreiras de rentabilidade, a falta de pessoal qualificado e outros obstáculos no mercado (WORREL e PRICE, 2011).

Devido a problemas de informação e controle, uma empresa bem gerida ainda pode ter à sua disposição oportunidades rentáveis que sejam difíceis de realizar. Uma tarefa da gestão é trazer à tona essas oportunidades e superar as barreiras que as impedem. Mesmo assim, um grande número de projetos potencialmente rentáveis,

incluindo alguns que geram economias de energia substanciais, deixam de ser realizados (DECANIO, 1993).

As barreiras para a implementação de eficiência energética foram investigadas em um extenso *survey* realizado por Rohdin et al. (2007). Foram identificadas barreiras, que podem ser classificadas em três categorias.

- a) categoria econômica: os custos escondidos, a falta de acesso a capital, o risco, a heterogeneidade, as informações imperfeitas, o relacionamento com o agente principal, a seleção adversa e os incentivos divididos são vistos como barreiras;
- b) categoria comportamental: racionalidade limitada, inércia, credibilidade e confiança, formulário de informações, valores das pessoas;
- c) categoria organizacional: a cultura organizacional e a falta de poder do tema dentro da organização.

Muitas ações devem ser tomadas para que se consiga melhorar os processos existentes e os procedimentos operacionais associados. Buscando ser eficientes, as melhorias em eficiência energética exigem muitas vezes um ajuste significativo na abordagem atual da utilização de energia. E para assegurar que a indústria adote tais incentivos, exige-se uma série de medidas para a introdução de melhorias técnicas e ao mesmo tempo o desmantelamento de várias barreiras para implementar tais melhorias, de forma sustentável. As necessidades são amplas e compreendem várias partes (MINCHNER, 2000).

A diferença de eficiência na indústria mostra a existência de diversos obstáculos à melhoria da eficiência energética que impedem que potenciais custos-benefícios se concretizem. Na tentativa de investigar os vários obstáculos e as oportunidades para superar as barreiras, o IPCC (2007) desenvolveu um quadro conceitual que mostra os potenciais físicos, tecnológicos, socioeconômicos, econômicos no mercado para tecnologias ambientalmente saudáveis e como as diferentes barreiras podem impedir cada nível de potencial de serem realizados. Também foram discutidas algumas ações e medidas que poderiam ajudar a superar as barreiras (HASANBEIGI et al., 2010).

Estudos sobre a implementação de medidas de conservação de energia de baixo custo mostram que estas nem sempre são implementadas por causa da existência de barreiras à eficiência energética, resultando em um chamado *gap* na eficiência energética. Barreiras relacionadas a falhas de mercado, por exemplo, de

informações imprecisas, incentivos repartidos, seleção adversa e de relacionamento do agente principal, justificam uma intervenção política pública no mercado (JAFFE e STAVINS, 1994; ENRICO e TRIANNI, 2014). Apesar do extenso potencial de eficiência energética, as medidas, por vezes, não são adotadas devido a várias barreiras, por exemplo, informações imprecisas e assimetrias. Para ultrapassar as barreiras, necessita-se que novas abordagens sejam implantadas, tal como a disponibilização de um banco de dados de medidas de eficiência energética (BLOMQVIST e THOLLANDER, 2015).

Além disso, grande parte dos chamados custos ocultos, por exemplo, o custo de busca para o investimento, são frequentemente citados como barreiras graves para a melhoria da eficiência energética (OSTERTAG, 1999; BLEYL e EIKMEIER, 2009).

No contexto da empresa pesquisada, a maior barreira de implementação é a falta de incentivo que existia para buscar formas de melhorar a gestão de energia. Isto só passou a ser um tópico importante de pesquisa nos últimos 4 anos.

Entretanto, o uso de simulação como método para mitigar essas barreiras se torna extremamente interessante, pois comprova como investimentos para melhorar o uso de energia podem gerar retornos financeiros. Ao utilizar a simulação para testar possíveis cenários diferentes, e verificar os impactos que geram em energia, dados mais concretos são gerados para a tomada de ação dentro da empresa.

### **2.1.3 Vantagens e desvantagens**

Nem sempre implementar um projeto de eficiência energética pode trazer vantagens para a organização. Por isso, é necessário explorar as possíveis vantagens e desvantagens.

Uma importante questão relativa à eficiência energética é que a obtenção de uma produção mais eficiente, em termos energéticos, pode resultar afetando outros indicadores, como custo ou qualidade (FYSIKOPOULOS et al., 2014).

Por outro lado, determinadas tecnologias identificadas como sendo de “eficiência energética”, por reduzirem o uso de energia, produzem uma série de melhorias adicionais para o processo de produção. Essas melhorias, incluindo menores custos de manutenção, aumento do rendimento de produção, condições de trabalho mais seguras, entre outras, são geralmente citadas como "benefícios de

produtividade" ou "benefícios não energéticos" (WORRELL et al., 2003). O Quadro 1 mostra os benefícios não relacionados à energia.

Quadro 1 - Benefícios não energéticos da melhoria de eficiência

Benefícios não energéticos da melhoria de eficiência		
Desperdício	Emissões	Operações e Manutenção
Uso de combustíveis, calor e gás desperdiçados	Reduzir emissão de poeira	Reduzir a necessidade de controles de engenharia
Reduzir desperdício de produto	Reduzir emissão de CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e SO <sub>x</sub>	Diminuir os requerimentos de resfriamento
Reduzir desperdício de água		Melhorar a confiabilidade das instalações
Redução de materiais		Reduzir o desgaste nos equipamentos e máquinas
		Redução dos requerimentos trabalhistas
Produção	Ambiente de Trabalho	Outros
Aumentar de saída de produtos e aumento de rendimentos	Diminuir a necessidade de EPIS	Diminuição da responsabilidade
Melhorar a performance do equipamento	Melhorar iluminação	Melhorar imagem pública
Diminuir o tempo de ciclo de processo	Reduzir barulho	Atrasar ou reduzir as despesas de capital
Melhorar qualidade de produto	Melhorar o controle de temperatura	Espaço adicional
Melhorar a confiabilidade na produção	Melhorar qualidade do ar	Melhorar a moral do trabalhador

Fonte: Worrell et al., 2003.

A gestão eficaz de energia industrial é frequentemente relacionada ao contexto, uma vez que depende de muitos fatores locais, tais como o desenho do produto, a escolha do processo e a mistura de combustíveis no país. Isso significa que pode vir a ser difícil replicar as soluções de uma indústria para outra, ou de um setor ou localidade diferente. A gestão de energia difere significativamente da gestão da qualidade. Embora as normas ISO compartilhem muitas semelhanças, como o ciclo PDCA (planejar, fazer, verificar, agir), a gestão da energia exige uma abordagem mais flexível, embora gere um quadro no qual boas práticas podem ser estabelecidas (VIKHOREV et al., 2013).

Resumindo, os sistemas de energia industriais são, em grande medida, de grande complexidade técnica e os investimentos são, muitas vezes, altos e, portanto, mais difíceis de realizar sem uma avaliação completa do investimento (BLOMQVIST e THOLLANDER, 2015).

Dentro do contexto da pesquisa, de acordo com a simulação, existe um *trade-off* entre a eficiência energética e a produção. Para baixar o consumo de energia, é

necessário o desligamento de algumas máquinas, o que impacta negativamente na produção de peças.

#### **2.1.4 Modelos identificados na literatura**

Muitos autores utilizaram diversas formas de analisar a eficiência energética, por meio de modelos propostos na literatura. Com a finalidade de filtrar os artigos que mais se adequavam à proposta da pesquisa, entre a vasta quantidade existente nos bancos de dados, foi realizada uma revisão sistemática da literatura e elaboradas tabelas com os autores e uma breve descrição dos modelos e *frameworks*.

##### **2.1.4.1 Revisão sistemática de literatura**

Uma revisão sistemática de literatura foi realizada pela autora, relacionando diversos desses modelos, o que resultou na publicação de um artigo que pode ser lido na íntegra no Apêndice B.

A metodologia utilizada foi uma revisão sistemática da literatura, baseada nas fases propostas no artigo de 2003 de Tranfield et al. As fases consistiram em: (a) identificar o assunto a ser pesquisado: (b) preparar a proposta da pesquisa (c) formular um protocolo, a fim de mostrar os termos de pesquisa que seriam utilizados, em quais bancos de dados, os critérios de exclusão a serem aplicados, os tipos de publicações e a janela de tempo da pesquisa (TRANFIELD et al., 2003).

Após a definição do protocolo, a pesquisa foi realizada usando-se os termos de pesquisa nos bancos de dados, momento em que se aplicou um filtro para verificar quais artigos adequavam-se à pesquisa, de acordo com os critérios definidos anteriormente no protocolo. Nesse estágio, a exclusão ocorreu na leitura dos resumos. Por fim, os artigos selecionados foram lidos na íntegra e analisados (TRANFIELD et al., 2003).

Para elaborar o protocolo de pesquisa, foram definidos três grupos de termos de busca. O primeiro englobou o tema “eficiência energética” e “gestão de energia”, o segundo grupo abordou palavras como “modelo” e “*framework*” e o último grupo buscou por modelos na indústria, especialmente na indústria automotiva. Nessa etapa da pesquisa, foram pesquisados os artigos que faziam parte dos três grupos.

Os critérios de exclusão definidos para a filtragem de artigos envolveram a eliminação dos trabalhos duplicados, a retirada dos artigos que não se encaixavam

na temática “eficiência energética” e “gestão de energia”, o descarte dos artigos que se referiam à gestão da energia em casas e, por fim, a eliminação dos artigos de periódico com ranqueamento inferior ao primeiro quartil da *Scimago*, um portal que inclui as revistas e os indicadores científicos a partir de informação contidas na base de dados *Scopus* (*SCIMAGO*, 2017). Este último critério foi definido porque o objetivo do processo era filtrar os trabalhos de melhor relevância na área, além de restringir o escopo da pesquisa.

As demais características da pesquisa podem ser verificadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Protocolo de pesquisa para a revisão bibliográfica

Termos de Busca (Resumo, Título ou Palavras-Chave)	Grupo 1: ("Energy and utility management*" OR "Energy efficiency" OR "Energy management" OR "Energy saving measures" OR "Industry energy efficiency" OR "energy measur*" OR "Energy-saving factors");
	Grupo 2: ("Conceptual model" OR "Maturity models" OR "Process mapping" OR "framework");
	Grupo 3: ("Manufacturing" OR "Manufacturing industry" OR "Car industry" OR "Automotive industry" );
Estratégia de Busca	AND entre grupos;
Bases de Dados	Science Direct, Wiley and Sons, Taylor and Francis, Springer, Scopus;
Critérios de Exclusão	Eliminar artigos duplicados;
	Eliminar artigos que no resumo não apresentem claramente que o tema do artigo refere-se à gestão de energia ou eficiência energética;
	Eliminar os artigos que se referem à eficiência energética em casas;
	Eliminar os artigos que são de periódicos com ranking inferior ao Q1 do Scimago nas categorias “Energy” e “Industrial and Manufacturing Engineering”;
Idioma	Inglês;
Tipo de Publicação	Artigos em periódicos internacionais com revisão de pares;
Intervalo de tempo	Não especificado

Fonte: a autora, 2017.

Após a filtragem, foi realizada uma análise do conteúdo dos artigos selecionados para verificar a finalidade de cada modelo listado.

#### 2.1.4.2 Análise dos modelos

Entre os trabalhos selecionados pela revisão sistemática de literatura, vários possuem características em comum que podem ajudar a criar uma conexão entre eles.

O primeiro tema que pode ser destacado são os artigos que propõem modelos que ajudam a contornar as barreiras de implementação da eficiência energética em

empresas. Os trabalhos de Minchner (2000), Dincer (2003), Thollander e Ottosson (2008), Hasanbeigi et al. (2010), Trianni et al. (2014) e Chai e Baudelaire (2015) tratam como se deve lidar com essas barreiras, conforme mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 - Barreiras

<b>AUTOR</b>	<b>ANALISE REALIZADA</b>
Minchner (2000)	O autor afirma que para implementar a eficiência energética com sucesso em um país como a China, é necessário atenuar as barreiras, com ações como a introdução de procedimentos mais eficazes para desenvolver e apoiar melhorias em eficiência energética.
Dincer (2003)	O autor lista os problemas relacionados ao meio ambiente e as principais dificuldades para a implementação de programas de conservação de energia. Alguns passos fundamentais são propostos para implementá-las com sucesso.
Thollander e Ottosson (2008)	Os autores estudam as barreiras existentes e que impedem as empresas de possuírem bons programas de eficiência energética. Evidências apontam que esse problema é causado pela forma como as empresas encaram o problema.
Hasanbeigi et al. (2010)	Os autores também estudam as barreiras, dessa vez, na Tailândia. Perceberam que a mais importante barreira expressa é o fato da gestão estar preocupada com produção e outras questões, em vez de com a eficiência energética.
Trianni et al. (2014)	Os autores propõem uma base estruturada de condutores que promovem a eficiência energética industrial, bem como, o conhecimento sobre as medidas de eficiência energética e compreensão das barreiras que bloqueiam a sua adoção.
Chai e Baudelaire (2015)	Os autores buscam entender as barreiras para a implementação de eficiência energética em Cingapura, usando um framework baseado em MOA ( <i>Motivation, Opportunity, and Ability</i> - Motivação, oportunidade e habilidade).

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

A próxima seção de trabalhos trata das políticas envolvidas para a adoção de medidas de eficiência energética, assim como, as melhores práticas identificadas por autores para a melhor implementação de ações de eficiência energética nos seus países. Por fim, nesse grupo estão também citados os artigos que tratam da norma ISO relacionada ao tema, a ISO 50001. Os artigos que fazem parte desse grupo são de Worrell and Price (2001), Demirbas (2008), Mills et al. (2008), Aflaki et al. (2013), Bashmakov e Myshak (2014), Gopalakrishnan et al. (2014), Rogan et al. (2014), Kesicki e Yanagisawa (2015) e Viklund (2015), cujos detalhes podem ser observados na Tabela 4:

Tabela 4 - Políticas e melhores práticas

<b>AUTOR</b>	<b>ANALISE REALIZADA</b>
Worrell and Price (2001)	Os autores investigam cenários relacionados ao uso de energia, levando em conta as políticas públicas dos EUA e procurando programas e tecnologias para melhorar a eficiência energética.

Demirbas (2008)	O autor analisa as prioridades energéticas que devem ser pesquisadas, assim como, os problemas que ocorrem no meio ambiente em decorrência da falta de energia.
Mills et al. (2008)	O autor lista as melhores práticas que as corporações devem adotar para formular uma estratégia corporativa de gestão energética.
Aflaki et al. (2013)	Os autores apresentam uma discussão sobre os desafios para buscar e implementar um projeto de eficiência energética que gere lucro.
Bashmakov and Myshak (2014)	Os autores avaliam se as políticas de eficiência energética propostas pela Rússia são eficazes.
Gopalakrishnan et al. (2014)	Os autores descrevem uma metodologia chamada de ISO 50001 <i>Analyzer</i> , que facilita o desenvolvimento de um sistema confiável de gestão energética alinhado com a ISO 50001.
Rogan et al. (2014)	Os autores propõem um modelo que mostra a oferta e a demanda de energia na Irlanda, permitindo avaliar e fornecer <i>insights</i> para políticas de eficiência energética.
Kesicki e Yanagisawa (2015)	Os autores explicam como o setor industrial é modelado de acordo com a Agência Internacional de Energia e apresentam oportunidades para a economia de energia no setor.
Viklund (2015)	O autor apresenta um estudo para analisar se a recuperação do excesso de calor é promovida ou desencorajada pelos instrumentos políticos.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Os trabalhos de Neelis et al. (2007), Hasanbeigi et al. (2011), Fleiter et al. (2012), Stenqvist e Nilsson (2012), Blomqvist e Thollander (2015), Johansson (2015), Hertel e Menrad (2016) e Liu (2015) referem-se a análises realizadas em diferentes localidades, em que os pesquisadores buscaram verificar como são realizadas as ações de eficiência energética nos países pesquisados, podendo mostrar como há diferentes ações tomadas de acordo com a localidade (Tabela 5):

Tabela 5 – Aplicação de estudos em eficiência energética em diversos países

<b>AUTOR</b>	<b>ANÁLISE REALIZADA</b>
Neelis et al. (2007)	Os autores apresentam um estudo das tendências em eficiência energética na indústria de fabricação holandesa, entre 1995 e 2003, utilizando indicadores públicos, a produção física e os dados de consumo específico de energia.
Hasanbeigi et al. (2011)	Os autores fazem uma avaliação do potencial de aplicação de um conjunto de medidas de eficiência energética na indústria de cimento na Tailândia.
Fleiter et al. (2012)	Os autores avaliam o programa estabelecido na Alemanha para fornecer subsídios para auditorias de energia em pequenas e médias empresas e como superar os obstáculos de eficiência energética.
Stenqvist e Nilsson (2012)	Os autores fazem um estudo para avaliar a eficácia do programa sueco para melhorar a eficiência energética em indústrias de energia intensiva.
Blomqvist e Thollander (2015)	Os autores buscam superar as barreiras para eficiência energética, criando uma base de dados que contém os dados relacionados com a eficiência energética da Suécia e dos EUA.
Johansson (2015)	O autor investiga o porquê de práticas de gestão de energia não serem implementadas em companhias de ferro e aço.

Herten e Menrad (2016)	Os autores estudam as barreiras que impedem as pequenas e médias empresas da Alemanha de adotarem práticas em eficiência energética.
Liu (2015)	Os autores avaliam como os programas de eficiência dos serviços públicos em nove jurisdições da América do Norte reagem aos picos sazonais de energia.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Existem várias técnicas na literatura utilizadas para fazer análises quantitativas de dados. Entre elas, destaca-se a Análise por Envoltória de Dados (DEA, do inglês *Data Envelopment Analysis*). Segundo Mukherjee (2008), este método utiliza programação matemática e cria uma fronteira linear por partes de melhores práticas, com base nos dados observados. Desde a sua introdução, a DEA vem sendo amplamente utilizada para estudar a eficiência em uma ampla gama de setores. Nos estudos, a técnica é utilizada para medir a eficiência energética de diversos setores industriais, ou diferentes regiões num mesmo país. Os trabalhos de Mukherjee (2008), Martinez (2011), Teske et al. (2011), Hu et al. (2012), Wang et al. (2012), Honma e Hu (2013) e Özkara e Atak (2015) fazem o uso dessa técnica, apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Estudos com DEA

AUTOR	ANÁLISE REALIZADA
Mukherjee (2008)	O autor analisa o uso da DEA para medir a eficiência energética em diferentes estados da Índia, para verificar como o setor de manufatura está tratando o tema.
Martinez (2011)	O autor utiliza a DEA para medir o desenvolvimento da eficiência energética nos setores não intensivos em energia na Alemanha e na Colômbia.
Tese et al. (2011)	Os autores apresentam uma revisão de medidas de eficiência energética dividida por setor industrial e região, para gerar um cenário de demanda energética mundial.
Hu et al. (2012)	Os autores usam DEA para medir a eficiência energética em diferentes estados em Taiwan.
Wang et al. (2012)	Os autores usam DEA para medir a eficiência energética em diferentes estados da China.
Honma e Hu (2013)	Os autores utilizam a DEA para medir o fator total em eficiência energética em diferentes setores da manufatura.
Özkara e Atak (2015)	Os autores usam DEA para medir a eficiência energética em diferentes estados na Turquia.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Diversos autores acreditam que a melhor forma para solucionar os problemas em eficiência energética é com o apoio de algoritmos para otimizar o uso de energia na indústria. Niknam et al. (2012), Frigerio e Matta (2016), Frigerio e Matta; (2015), May et al. (2015), Salido et al. (2016), Shui et al. (2015) e Zhang e Chiong (2016) são exemplos do uso desse método (Tabela 7):

Tabela 7 – Algoritmos para melhorar o uso de energia

<b>AUTOR</b>	<b>ANALISE REALIZADA</b>
Ninam et al. (2012)	Os autores apresentam uma proposta de algoritmo para melhorar a gestão de energia usando microrredes (um aglomerado de carga elétrica).
Frigerio e Matta (2015)	Os autores apresentam uma proposta de método de gerenciamento de máquinas, por meio de um algoritmo, a fim de encontrar formas de desligar as máquinas quando não estão sendo usadas e conectá-las novamente quando são necessárias, gerando economia de energia.
Frigerio e Matta; (2016)	Os autores continuam o estudo anterior, analisando a gestão de máquinas de acordo com as linhas de produção de produtos.
May et al. (2015)	Os autores usam um algoritmo genético (GA) para melhorar a eficiência energética no desempenho de um sistema de produção, considerando os objetivos de produtividade e consumo de energia para investigar os efeitos das políticas na programação de produção.
Salido et al. (2016)	Os autores usam o algoritmo genético para solucionar um problema na programação de produção, em que as máquinas podem consumir diferentes quantidades de energia para processar tarefas em taxas diferentes.
Shui et al. (2015)	Os autores apresentam uma proposta de modelo matemático para estimar a demanda de energia e de produção e, com isso, avaliar a eficiência energética no setor da indústria automobilística utilizando os dados de consumo de produção e de serviços públicos em nível de planta.
Zhang e Chiong (2016)	Os autores usam um algoritmo genético (GA) para melhorar a eficiência energética no desempenho de um sistema de produção incorporando duas estratégias de melhoria locais para minimizar o consumo de energia.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Vários autores propuseram modelos para melhorar a eficiência energética de diversas formas. Lee e Onisko (1994), Sundberg e Wene (1994), Ardehali e Smith (2007), Soytaş e Sari (2007), Salta et al. (2009), Seow e Rahimifard (2011), Ngai et al. (2012), Bonvoisin et al. (2013), Liu et al. (2013), Ngai et al. (2013), Vikhorev et al. (2013), Arigliano et al. (2014), Lee e Prahbu (2015), Wang et al. (2015) e Zhong et al. (2016), Miah et al. (2015), Shrouf e Miragliotta (2015), Uluer et al. (2015), Gahm et al. (2016) propuseram modelos, conforme Tabela 8, a seguir:

Tabela 8 - Modelos para melhorar a eficiência energética

<b>AUTOR</b>	<b>ANALISE REALIZADA</b>
Lee e Onisko (1994)	Os autores apresentam uma discussão sobre a análise do custo do ciclo de vida como um <i>framework</i> destacando as diferenças entre os critérios econômicos e as perspectivas dos consumidores e utilitários para projetar programas de eficiência energética.
Sundberg e Wene (1994)	Os autores propõem um modelo de programação não linear, chamado MIMES (Modelo para a descrição e otimização dos fluxos Integrados de Materiais e Sistemas de Energia), a fim de fornecer uma ferramenta para auxiliar nas decisões em sistemas com materiais incorporados e fluxos de energia.
Ardehali e Smith (2007)	Os autores propõem um <i>framework</i> para a classificação de medidas de eficiência energética (EEM), com base em suas características físicas e inerentes.

Soytas e Sari (2007)	Os autores investigam, por meio de uma estrutura multivariada, a relação entre energia e produção no nível de indústria na Turquia.
Salta et al. (2009)	Os autores desenvolvem um <i>framework</i> com base em indicadores de eficiência energética físicos para medir o uso de energia em diferentes setores industriais na Grécia.
Seow e Rahimifard (2011)	Os autores adotam uma abordagem para modelar os fluxos de energia em um sistema de produção, visando ao consumo enxuto de energia. Esta abordagem utiliza os dados de consumo de energia nos níveis de "planta" e "processo" para fornecer uma análise mais profunda da energia utilizada durante a produção.
Ngai et al. (2012)	Os autores utilizam metodologia de sistemas flexíveis para identificar oportunidades de sistema de apoio à gestão para gerenciar o uso de energia e utilidade.
Bonvoisin et al. (2013)	Os autores propõem a integração de uma estrutura de conservação de energia, já na concepção de um novo produto, gerando resultados como <i>ecodesign</i> e as iniciativas de produção mais limpa.
Liu et al. (2013)	Os autores propõem um <i>framework</i> para uma construção eficiente, buscando incorporar a programação de produção a fim de tornar mais eficiente a energia gasta na fabricação.
Ngai et al. (2013)	Os autores propõem um <i>framework</i> de maturidade de energia e utilidade que mede sistematicamente o consumo de recursos naturais e orienta o avanço organizacional em gestão de energia e utilidade.
Vikhorev et al. (2013)	Os autores propõem um <i>framework</i> de monitoramento de energia e gestão de cada ativo produtivo individual e de processos relacionados à energia na fábrica.
Arigliano et al. (2014)	Os autores ajudam na modelagem e otimização de sistemas de produção de energia, armazenamento e consumo.
Lee e Prahbu (2015)	Os autores propõem um modelo de controle de <i>feedback</i> consciente de energia para a programação de produção e controle de capacidade.
Wang et al. (2015)	Os autores visam à energia enxuta, usando um método para pesquisar o processo de consumo de energia em sistemas de produção/remanufatura, usando a simulação para testar sua precisão.
Miah et al. (2015)	Os autores apresentam um <i>framework</i> que incorpora intervenções tecnológicas para as fábricas avaliarem as oportunidades de integração de calor, incluindo baixo grau e calor, com o objetivo de melhorar a eficiência energética.
Shrouf e Miragliotta (2015)	Os autores apresentam um <i>framework</i> de integração da tecnologia da Internet das coisas com as práticas de gestão da produção eficientes em termos energéticos.
Uluer et al. (2015)	Os autores propõem um <i>framework</i> para reduzir o consumo de energia na fabricação por meio de três pilares: a criação de um perfil de energia de uma cadeia de processos, projetos de peças que levam em conta o gasto energético e o plano de processo com base nas normas ISO/STEP 10303 AP224.
Gahm et al. (2016)	Os autores propõem o desenvolvimento de um <i>framework</i> para programação da eficiência energética dentro de uma fábrica.
Zhong et al. (2016)	Os autores têm o objetivo de auxiliar os profissionais na seleção de modelos para calcular o consumo de energia nos processos de corte de metal para uma situação e propósito particulares, com um método explicado sistematicamente no artigo.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Outros métodos e abordagens foram estabelecidos por autores, não sendo exatamente modelos de aplicação. São trabalhos que utilizam certificados brancos

negociáveis, melhoria de energia por meio de mudanças de *layout*, entre outros. Os trabalhos são os de Perrels (2008), Aguirre et al. (2011), O'Driscoll et al. (2013), Sivill et al. (2013), Yang et al. (2013a), Yang et al. (2013b), Fysikopoulos et al. (2014), Jeon et al. (2014), Zampou et al. (2014), Raileanu et al. (2015) e Tristo et al. (2015) (Tabela 9):

Tabela 9 - Métodos e abordagens

AUTOR	ANÁLISE REALIZADA
Perrels (2008)	O autor explica os prós e os contras de certificados brancos negociáveis para alcançar a eficiência energética.
Aguirre et al. (2011)	Os autores apresentam uma metodologia para medir a eficiência energética industrial relativa entre plantas dentro de um setor de fabricação por meio do uso de assinaturas de produção de energia.
O'Driscoll et al. (2013)	Os autores afirmam que o setor de fabricação deve se concentrar em transparência energética que se obtém ligando um sistema de medição de energia eficaz para monitorar e controlar as necessidades de energia de uma fábrica. Com mais visibilidade energética, verifica-se que se torna mais fácil identificar oportunidades para melhorar a eficiência energética.
Sivill et al. (2013)	Os autores propõem um desenvolvimento de uma medição de desempenho energético em setor industrial com uso intensivo de energia.
Yang et al. (2013a)	Os autores propõem uma nova abordagem de planejamento de instalações para empresas com grande consumo de energia.
Yang et al. (2013b)	Os autores utilizam um atributo com várias abordagens de tomada de decisão para resolver o problema de projeto de leiaute das instalações, considerando ambos os critérios de leiaute tradicionais e os critérios relevantes de energia.
Fysikopoulos et al. (2014)	Os autores apresentam uma abordagem para estudar eficiência energética na fabricação, com uma divisão da definição de eficiência energética em quatro níveis de produção: processo, máquina, linha de produção e fábrica.
Jeon et al. (2014)	Os autores buscam uma maneira de melhorar a eficiência energética das instalações que utilizam pegadas de energia na fábrica.
Zampou et al. (2014)	Os autores propõem um estudo em que os sistemas de informação estão cientes em termos energéticos, integrando as tecnologias de captura de dados, medição de energia baseada em processo e otimização das operações.
Raileanu et al. (2015)	Os autores propõem uma abordagem baseada em agentes para medir, em tempo real, o consumo de energia dos recursos nos processos de fabricação da área de trabalho, a fim de buscar otimizar o consumo de energia, de forma mais fácil e mais rápida.
Tristo et al. (2015)	Os autores usam um método para medir o consumo de energia dos processos de fabricação de indústrias com utilização intensiva de energia.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Os próximos artigos selecionados têm como foco a eficiência energética em linhas de usinagem. Levando em conta que o trabalho terá aplicação dentro de uma linha de usinagem, é importante verificar os métodos empregados neste tipo de linha. Vários estudos foram realizados especialmente nesse tipo de operação, entre eles os de Larek et al. (2011), Newman et al. (2012), Jia et al. (2014), Li et al. (2014), Peng

and Xu (2014), Yingjie (2014), Jia et al. (2016), Zhang e Ge (2015) apresentados na Tabela 10 que segue:

Tabela 10 - Modelos propostos em processos de usinagem

<b>AUTOR</b>	<b>ANÁLISE REALIZADA</b>
Larek et al. (2011)	Os autores descrevem uma abordagem baseada na simulação de eventos discretos para gerar um perfil de consumo específico de peças de trabalho e impressões de energia na operação de usinagem.
Newman et al. (2012)	Os autores apresentam um método para validar a introdução de consumo de energia nos objetivos para o planejamento do processo em usinagem CNC.
Jia et al. (2014)	Os autores propõem um método para otimizar o consumo de energia nos processos de usinagem por meio de um método de demanda de energia utilizando o <i>therblig</i> , um dos conceitos básicos de estudo de movimento, para representar a unidade básica de energia.
Li et al. (2014)	Os autores geram um <i>framework</i> que analisa as características de consumo de energia em sistemas de manufatura de usinagem, de um ponto de vista holístico, procurando máquinas com energia mais eficiente.
Peng e Xu (2014)	Os autores demonstram <i>frameworks</i> que promovem usinagem eficiente de energia, com foco em modelos de quatro categorias: teórico, empírico, baseado em eventos discretos e modelos híbridos.
Yingjie (2014)	O autor faz uma revisão bibliográfica que reúne diversos artigos de eficiência energética em usinagem.
Jia et al. (2016)	Os autores utilizam o método de extração da atividade de usinagem e herança de atributos de energia para apoiar a estimativa de energia inteligente de processos de usinagem.
Zhang e Ge (2015)	Os autores propõem uma nova estratégia de planejamento do processo, baseando-se na eficiência energética em um processo de usinagem, onde o consumo de energia de uma máquina é estimado por meio do cálculo de acordo com a sua taxa de remoção de material.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

Por fim, os últimos modelos propostos mostram as melhorias técnicas em máquinas aplicadas para aumentar a eficiência energética segundo Chuí e Goldsmith (2006), Schall e Hirzel (2012) e Moura et al. (2013), conforme mostrado na Tabela 11:

Tabela 11 - Melhorias técnicas em máquinas

<b>AUTOR</b>	<b>ANÁLISE REALIZADA</b>
Chuí e Goldsmith (2006)	Os autores propõem uma técnica cooperativa de entradas e saídas múltiplas com vários nós dentro de um <i>cluster</i> para reduzir o consumo de energia e os atrasos.
Schall e Hirzel (2012)	Os autores investigam o custo e a eficácia dos sistemas de refrigeração térmica para as empresas industriais e como essas ações influenciam a eficiência energética.
Moura et al. (2013)	Os autores apresentam uma visão geral sobre as principais características das redes inteligentes, para integrar a eficiência energética nas tecnologias capacitadoras.

Fonte: a autora, 2017, baseada nos autores citados.

### 2.1.5 Eficiência Energética na Usinagem

Atualmente, a usinagem continua a ser uma das técnicas mais importantes para a fabricação, e vem sendo amplamente utilizada nas indústrias de manufatura. Ela também representa uma grande demanda por energia. Assim, a redução do consumo de energia no processo de usinagem pode melhorar significativamente o desempenho ambiental dos processos de fabricação. Embora a mecânica de usinagem venha recebendo atenção e desenvolvimento consideráveis, a análise de energia para este processo ainda é uma questão relativamente nova (YINGJIE, 2014).

Como os processos de usinagem causam impactos mensuráveis sobre o meio ambiente, devido a quantidades substanciais de consumo de energia, a redução de seu consumo é uma questão muito crítica. Para alcançar isso, os fabricantes de máquinas e ferramentas podem contribuir para a solução desse problema, otimizando as funções de máquinas (YINGJIE, 2014).

A usinagem é muito comum e um dos processos de fabricação que apresentam maior gasto de energia secundária em muitas indústrias de manufatura discreta. Hoje, máquinas avançadas, tais como equipamentos de informática numérica controlada (*Computer Numeric Control - CNC*) permitem alta precisão na fabricação de peças e, junto com robôs e transportadores, ajudam a alcançar as altas taxas de produção exigidas pela produção em massa. Grande parte dos estudos sobre a eficiência energética em nível de processo podem ser subgrupadas em modelagem e otimização (ULUER et al., 2015).

Diaz et al. (2010) afirma que o consumo de energia em centros de usinagem pode representar 60% da conta total de energia do ciclo de vida da máquina.

Estudos sobre eficiência energética em sistemas de usinagem preocupam toda a cadeia produtiva, com ênfase em comportamentos de energia e na redução a um nível sistemático. Um sistema de usinagem eficiente em energia incorpora monitoramento de dados, modelagem de energia, planejamento de processo e programação, controle de usinagem e integração de sistemas, com o objetivo de alcançar os requisitos de qualidade exigidos e atingir a meta de custo, enquanto o consumo de energia é minimizado (PENG e XU, 2014).

Um centro de usinagem pode ser modelado do ponto de vista energético de acordo com as funções que estão exercendo no momento (MAY et al., 2015):

- (a) *Off*: aparelho está desligado e nenhuma energia é necessária.

- (b) *Standby*: a máquina tem a maioria dos componentes desligada e não está pronta para processar as peças. Apenas alguns componentes são alimentados pela energia, a fim de acelerar o tempo de ativação.
- (c) *Ocioso*: a máquina está pronta para processar peças e uma quantidade significativa de consumo de energia é necessária para executar todo o equipamento auxiliar.
- (d) *Setup*: a máquina está mudando a ferramenta e, além disso, a energia consumida para a mudança real da ferramenta é necessária.
- (e) *Trabalho*: a máquina está processando a peça e a potência está no máximo.

As questões em relação à avaliação da eficiência energética nos processos de usinagem que devem ser estudadas são descritas da seguinte forma (YINGJIE, 2014):

1. É necessário estudar a eficiência energética para vários tipos de máquinas-ferramentas, componentes principais e componentes reconfiguráveis, a fim de que as técnicas de eficiência energética possam ser aplicadas em sistemas de usinagem avançados, como os sistemas de produção flexível, sistemas de usinagem reconfiguráveis, etc.;
2. É necessário estudar o mapa de consumo de energia para vários processos de usinagem que poderiam ser utilizados como um padrão para as melhorias da configuração e da estrutura da máquina, para reduzir a energia de não corte no processo de usinagem;
3. É necessário construir orçamentos diferentes de energia que podem ser usados para melhorar o modelo de avaliação de energia existente das máquinas;
4. É necessário construir modelos de avaliação de energia para vários processos de usinagem, a fim de que sejam úteis para fornecer suporte;
5. É necessário estudar as metodologias de projeto que levam em consideração a eficiência energética, as técnicas para avaliar a eficiência de energia para componentes importantes, como máquinas e sistemas de usinagem. As questões incluem estudos de eficiência energética para os componentes reconfiguráveis de tipos diferentes, máquinas reconfiguráveis e a reconfiguração dos sistemas de usinagem.
6. É necessário estudar abordagens alternativas para diminuir o tempo necessário no processo de usinagem para a melhoria da eficiência de

energia que pode ser alcançada por meio de uma redução da cadeia de processo. Tecnicamente, o desempenho de corte de alta velocidade com eficiência energética tem sido realizado, apesar da usinagem de alto desempenho levar a um maior desgaste abrasivo de ferramentas mobilizadas, que devem ser incluídas na avaliação ecológica e na avaliação de corte de alta velocidade.

### 2.1.6 Simulação na eficiência energética

A simulação de eventos discretos pode ser definida como (KOUKI et al, 2017):

A simulação de fluxo dinâmico ou a simulação de eventos discretos (SED) é um método para antecipar a evolução de sistemas complexos onde múltiplos fatores tornam difícil ou mesmo ineficaz a abordagem estática e analítica. Este método permite a criação de um *layout* digital comumente usado para o projeto do sistema de fabricação ou operações, incluindo operações de planejamento e programação, controle em tempo real, políticas operacionais e análise de desempenho.

No planejamento de produção, os recursos são utilizados e alocados da forma mais eficiente possível, visando a atender as demandas dos clientes. Modelos de otimização são frequentemente usados para fornecer suporte. A simulação de eventos discretos (SED) é normalmente usada para criar esses modelos de otimização, os quais simulam fluxos de material e produtos por meio de um sistema de produção tendo o custo e o tempo como o foco de otimização (THIEDE et al. 2012).

Face à preocupação da sociedade com os impactos ambientais, surgem pesquisas que integram modelagem em fluxos de energia com SED, visando melhorar o desempenho dos sistemas de manufatura e a sustentabilidade. Impactos ambientais, como o consumo de energia, são parâmetros a serem controlados, sendo, para isso, necessárias ferramentas confiáveis para controlá-las (KOUKI et al, 2017).

A SED não vem sendo amplamente utilizada para analisar as questões ambientais, devido às despesas elevadas e ao tempo que os projetos de simulação demandam. Além disso, o modelador necessita de um treinamento especial, dificilmente encontrado dentro da maioria de companhias (THIEDE et al. 2012).

O meio para modelar e simular o consumo total de energia dentro de sistema parte da medição de cada máquina. O perfil energético de cada uma das máquinas deve ser analisado para que essas informações sejam, posteriormente, introduzidas dentro do software de simulação. O perfil de carga energético pode ser constante ou variável, dependendo do estado da máquina (KOUKI et al, 2017). Já Thiede et al.

(2012) afirmam que é crucial entender que o consumo de todas as formas de energia e recursos não são estáticas e que estes variam de acordo com o estado da máquina (ligada, desligada, em espera, etc.).

Os dados de consumo de máquina que alimentam as simulações, normalmente são adquiridos por meio de medição. Contudo, em alguns casos, eles podem ser adquiridos por meio de modelos empíricos ou documentos técnicos (ABELE et al., 2015).

Abele et al (2015) descrevem que as máquinas, dentro de uma linha de produção, funcionam mediante alimentação de energia, que varia de acordo com o estado em que elas estejam funcionando. A sequência de estados em que a máquina se encontra define a sua demanda por energia. Este comportamento pode ser suportado pelo *software* de simulação.

A dinâmica no modelo determina o consumo de energia real para o recurso. A abordagem permite a coleta de dados simplificada com um consumo de energia fixo para cada estado. Em alguns casos, pode ser relevante usar diferentes estados de processo para diferentes tipos de produtos (THIEDE et al. 2012).

Weinert et al (2011) introduziram o conceito de bloco de energia, que é o estado em que a máquina se encontra durante a produção. Ele é representado por um nível de potência e uma duração para que o perfil de energia de todo o processo possa ser reproduzido por uma sucessão desses blocos. Cada tipo de equipamento possui vários estados operacionais que exibem diferentes padrões de consumo de energia que podem ser identificados em seu perfil de potência. Os estados de funcionamento são, por exemplo: desligado, ligando, aquecendo, em espera, processando e parado. Diferentes comportamentos de consumo geram diferentes parâmetros de processo. Estes, por conseguinte, geram um comportamento de consumo de energia que pode ser reproduzido em uma simulação (WEINERT et al., 2011).

Hermann e Thiede (2009) sintetizam que:

O objetivo da abordagem através de simulação da cadeia de processo é a representação realista do sistema de produção com todas as interdependências e dinâmicas do equipamento técnico envolvido para permitir o projeto e o controle do sistema de produção, tanto em relação às variáveis econômicas quanto ecológicas. Deste modo, todos os fluxos de entrada e saída relacionados com a energia são explicitamente considerados. Isto permite uma avaliação integrada que combina objetivos como, por exemplo, Tempo de produção, quantidades e disponibilidade do sistema com padrões de consumo de energia, e respectivamente, verificar o impacto no custo de energia.

## 2.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No capítulo de referencial teórico, foram analisadas seis frentes de pesquisa objetivando embasar o campo de eficiência energética.

Primeiramente, foi abordada a definição do tema, ou seja, foram apresentadas pelos autores da literatura definições técnicas para eficiência energética, quais são os desafios que essa área enfrenta, a importância que a gestão da energia tem para a indústria mundial e como a gestão de energia pode ajudar na preservação do meio ambiente. Ademais, destaca-se a importância do controle dos gastos energéticos para que possa existir uma gestão energética e é a norma internacional que controla a gestão de energia, a ISO 50001.

No segundo tópico pesquisado, foram verificadas as barreiras de implementação da eficiência energética nas empresas, ou seja, o que as impede de implementar projetos de gestão energética com sucesso. Algumas das barreiras encontradas na literatura são: a falta de recursos para investir em projetos, a falta de informação sobre a importância desse estudo, a falta de cultura dentro das empresas e, muitas vezes, as dificuldades geradas pela burocracia para a implementação de um programa de eficiência energética.

No tópico seguinte, foram investigadas as vantagens e as desvantagens da eficiência energética. Entre as vantagens identificadas estão a redução de custos, a redução no gasto de energia, a redução nos impactos no meio ambiente e, entre as desvantagens, o custo de implementação e a dificuldade técnica para o funcionamento de um projeto de gestão de energia.

O quarto tópico apresentou uma extensa revisão de modelos identificados na literatura: artigos sobre a implementação de projetos de eficiência energética, artigos detalhando como foi a implantação de projetos de gestão energética, artigos comparativos sobre eficiência energética nos diversos setores industriais dentro de um país, propostas de modelos para adoção de um projeto de eficiência energética. Essa parte da pesquisa serviu como base para um artigo, que pode ser utilizado como banco de dados de artigos para futuros pesquisadores que pode ser visitado no Apêndice B.

Como a pesquisa foi implementada dentro de uma linha de usinagem, o capítulo 2.1.5 dedicou-se a descrever as particularidades do estudo de gestão de energia dentro de uma dessas linhas, a qual caracteriza-se por um consumo grande de

energia além de apresentar diferentes consumos de acordo com os estados que os centros de usinagem se encontram (por exemplo, trabalhando, desligados ou em estado ocioso).

Por fim, a última seção descreveu como pode ser utilizada a simulação em estudos de eficiência energética, de acordo as particularidades que devem ser empregadas nesse tipo de estudo.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 SIMULAÇÃO

A ferramenta de simulação foi definida como metodologia a ser utilizada para realizar os testes em eficiência energética em uma linha nova. O uso de simulação para este fim foi utilizado por alguns autores na literatura. Gomes (2015) reúne uma lista de autores que fizeram uso do método, assim como, apresenta um modelo que mostra como a simulação pode ser utilizada para realizar testes em uma linha operante, buscando formas de aperfeiçoá-la.

“Simulação é a experimentação de um sistema real através de modelos” (BATEMAN, 2013). Os modelos de simulação são considerados poderosos e são utilizados para analisar sistemas complexos. A simulação é considerada a imitação de um processo ou sistema que existe na vida real, e que acontece no decorrer do tempo (MORABITO NETO e PUREZA, 2012). Para isso, é necessário gerar um histórico do sistema artificial e observar esse histórico para definir as interferências neste sistema, para que ele se torne mais similar ao caso real que está sendo representado (BANKS, 1999). Além disso, a simulação tem a vantagem de ser uma representação mais simplificada da realidade, evidenciando os aspectos mais importantes do sistema real (FORSEN-NYBERG e HARAMAKI, 1998).

A importância da simulação vem da possibilidade de criar e simular cenários e verificar o quanto as mudanças são representativas, auxiliando na tomada de decisões. (BATEMAN, 2013)

Para Banks (1999) a simulação é uma metodologia indispensável para resolução de diversos problemas da “vida real”, pois é utilizada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, fazer perguntas do tipo “e se?” sobre o sistema real, e ajudar no desenvolvimento do mesmo.

O modelo de simulação permite colocar componentes do sistema deixando-os mais fáceis de compreender a realidade, permitindo realizar experimentos para prever o comportamento de um sistema real (BATEMAN, 2013).

Partindo da premissa que as simulações incluem características, regras e estratégias que imitam o sistema da realidade, isso leva a um ambiente com menor risco de erros e que gera um aprendizado maior sobre o sistema real, sem que haja

consequências caso as alterações gerem erros (ALDURGHAM e BARGHASH, 2008; CONNOLLY e STANSFIELD, 2007).

Para compreender o uso de simulações, é necessário o entendimento de alguns termos, como os citados abaixo por Banks (1999):

- a) Modelo: É a representação de um sistema real;
- b) Evento: é uma ocorrência que altera o estado do sistema;
- c) Variáveis de estado do sistema: são todas as informações necessárias para definir o que está acontecendo no sistema, em nível de detalhe suficiente para se obter o resultado desejado, em certo período de tempo. Alguns exemplos dessas variáveis são tempo de ciclo de máquinas, as quebras e reparos do maquinário, tempo de setup, mão de obra, gasto energético da máquina.
- d) Modelo de simulação de eventos-discretos: É definido como um modelo onde as variáveis de estado só sofrem alteração nos pontos discretos de tempo em que o os eventos ocorrem.

Gomes (2015) resume num quadro os elementos necessários para a elaboração de uma simulação como a empregada neste trabalho. O sistema definido a ser trabalhado é uma linha de produção; as entidades que estão envolvidas, os atributos de cada uma das entidades; os eventos envolvidos na linha, as atividades realizadas; e por fim, as variáveis de estado das entidades. Cada uma delas pode ser vista no Quadro 2.

Quadro 2 - Elementos necessários para elaboração de uma simulação

Sistema	Entidades	Atributos	Eventos	Atividades	Variáveis de Estado
Linha de Produção	Máquinas, peças, operadores	Dimensão de peças, velocidade de transporte	Quebra (parada de máquina), <i>setup</i> , mudança de turno	Processar operação, transportar peças	Status das máquinas (ocupadas, em espera, vazias)

Fonte: Gomes, 2015.

O que se destaca como vantagem da simulação é a capacidade de gerar as estatísticas de desempenho, mantendo a flexibilidade para inserir detalhes organizacionais específicos. Ela pode ser usada para lidar com a incerteza e criar visualizações dinâmicas de níveis de inventário, *lead-times* e utilização da máquina para diferentes projeções de estado futuros (ABDULMALEK e RAJGOPAL, 2007).

Em contrapartida, uma desvantagem clara em relação ao uso de simulação vem do fato de que é necessária a mão de obra especializada na ferramenta para que esta seja utilizada com precisão. Isso envolve treinamento de pessoal, gasto com a compra ou licenciamento da ferramenta, e em alguns casos, contratação de uma empresa terceira para realizar o serviço.

A fase mais crítica quando se está realizando testes com simulação, é a fase de validação do modelo. Nesta etapa é realizada a comparação de como a simulação está trabalhando com o desempenho do sistema real (ABDULMALEK e RAJGOPAL, 2007). Um exemplo que pode ser utilizado para comparação é o rendimento operacional de uma linha de produção, para ver se o que está sendo medido na linha real é comparável ao da linha simulada.

Com o foco em eficiência energética, o uso de simulação mais comum nesses casos é no conceito de “bloco de energia”. Nesse método, o comportamento de consumo de energia que uma máquina pode assumir é dividido em estados de operação, como “desligado”, “estado de espera”, “processando”, “setup” e “quebra”. Quando se associa um padrão de consumo de energia para cada estado da operação, verificado através de medições, é possível fazer o cálculo do consumo energético de uma operação (CATALDO ET AL., 2015).

O modelo definido nesta dissertação utilizará dois softwares de simulação em paralelo para realizar os experimentos, o Plant Simulation e o Witness 13, pois eram dois softwares que a autora tinha acesso na empresa que trabalhava.

A utilização destes softwares se deve às diferentes funções da simulação permitidas em cada um deles. O Witness é um software melhor para realizar análises e testes no fluxo da linha de produção, por ser mais simples e permitir simulações de longo prazo. Já o Plant Simulation é um software mais complexo, que permite simulações de tempos mais curtos, porém, que possui o diferencial de permitir testes de consumo energético.

### 3.2 PROJETO DE SIMULAÇÃO

A parte mais difícil de estabelecer um projeto de simulação é definir como são os passos a serem estabelecidos. Isso se deve talvez porque estabelecer um modelo conceitual é mais uma arte do que uma ciência, portanto dificultando o estabelecimento de métodos e procedimentos (ROBINSON, 2007).

A primeiras partes de um estudo de simulação podem ser quebradas em vários processos: formulação de problemas, avaliação de viabilidade de simulação, definição de sistemas e objetivos, formulação de modelos, representação de modelos e programação (BALCI, 1994 apud ROBINSON, 2007).

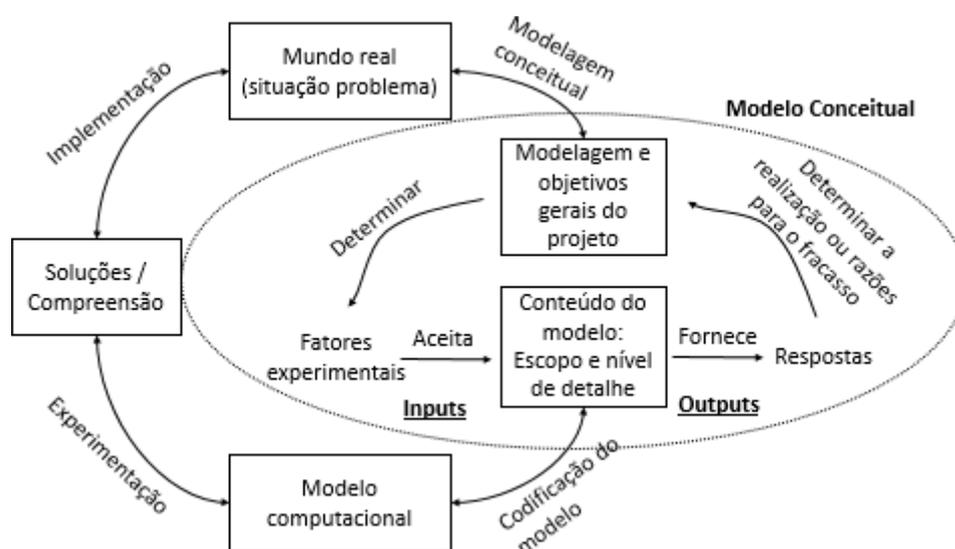
Entretanto, esses estágios iniciais de um estudo de modelagem não são apenas visitados uma vez, sendo continuamente retornados através de uma série de iterações no ciclo de vida de um projeto. Sendo assim, a modelagem conceitual não é um processo único, mas que é repetido e refinado um número de vezes durante um estudo de simulação (ROBINSON, 2007).

Robinson (2007) propõe um modelo de como são as etapas de um projeto de simulação, conforme Figura 5.

Os passos são verificar qual é a situação problema no mundo real, depois modelar os objetivos gerais do projeto, determinar os fatores experimentais, e colocá-los como conteúdo do modelo, de acordo com o escopo do projeto e o nível de detalhe almejado.

Depois de realizar este modelo conceitual, é estabelecido o modelo computacional do projeto, onde serão realizados os experimentos, que gerarão as soluções necessárias. Por fim, o que for considerado importante será implementado no mundo real (ROBINSON, 2007).

Figura 5 - Modelo de aplicação de projeto de simulação



Fonte: Robinson, 2007.

Ao conduzir um projeto de simulação, recomenda-se que uma abordagem sistemática seja planejada e aderida. Uma regra estabelecida nos textos de simulação é a "40-20-40" que afirma que, ao desenvolver um modelo, o tempo de um analista deve ser dividido da seguinte forma (RYAN e HEAVEY, 2006):

(1) 40% para a definição de requisitos, tais como a definição do problema, planejamento de projeto, definição de sistema, modelo conceitual, formulação, desenho preliminar do experimento e os dados de entrada, preparação;

(2) 20% para modelar a simulação;

(3) 40% para experimentações como validação de modelos e verificação, análise, interpretação, implementação e documentação.

Considerando o que foi estabelecido pelos autores, é possível separar a implementação do projeto de simulação por etapas:

ETAPA 1 – Verificar o problema a ser estudado na simulação;

ETAPA 2 – Definir como será realizada a modelagem;

ETAPA 3 – Modelar o objeto de estudo no software, de acordo com o nível de detalhe e escopo estabelecido;

ETAPA 4 – Realizar os testes dos cenários desejados, e verificar os resultados obtidos;

ETAPA 5 – Analisar os dados obtidos;

ETAPA 6 – Implementar o que for necessário no objeto real de estudo.

## 4 PROPOSTA DE MODELO

O objetivo dessa dissertação foi propor um modelo para a melhoria de eficiência energética em um projeto de linha de usinagem. Essa linha ainda não foi implementada e, por conseguinte, os experimentos foram realizados por meio de um software de simulação.

Com a finalidade de que a proposta do novo modelo estivesse em conformidade com o objetivo para o qual este será utilizado, foram usados, como referência no seu processo de criação, modelos propostos por diversos autores.

Os modelos que fundamentaram o trabalho foram encontrados por meio de uma revisão sistemática de literatura, além de em teses de doutorado que utilizaram métodos similares aos encontrados no presente trabalho.

### 4.1 MODELO PROPOSTO

#### 4.1.1 Referências de modelos

Diversos trabalhos foram pesquisados na revisão sistemática da literatura e alguns foram usados como referência para a elaboração do modelo proposto.

De cada um dos modelos utilizados como referência, foram selecionadas uma ou mais características. Os trabalhos utilizados foram os de Larek et al. (2011), May et al. (2015), Vikhorev et al. (2013), Carvalho (2015) e Gomes (2015).

A escolha desses modelos deu-se por serem estes os que mais se adequavam à aplicação na simulação.

As características selecionadas nos modelos de referência foram escolhidas por se adaptarem à realidade da planta automotiva onde a simulação foi realizada.

As propostas de cada um dos modelos, bem como suas características, estão descritas a seguir.

O trabalho elaborado por Larek et al. (2011) descreve uma abordagem baseada na simulação de eventos discretos adaptada para modelar operações de usinagem e gerar perfis de consumo de energia específicos, por peça, e pegadas de energia. O objetivo dos autores é fornecer uma base para novas aplicações como a simulação, a comparação e a otimização do consumo de energia em cadeias de processos e sistemas de produção em combinação com modelos logísticos. A estrutura do modelo, objeto desse trabalho, baseou-se no modelo de Larek et al. (2011).

O trabalho de May et al. (2015) investiga os efeitos das políticas de programação de produção voltadas para a melhoria das performances produtivas e ambientais em uma área de trabalho. O modelo utiliza um algoritmo genético para avaliar os problemas de vários objetivos relacionados à sustentabilidade. Nesse algoritmo são inseridas informações sobre os estados das máquinas a serem estudadas e o consumo energético de cada um dos estados. Essa foi a característica utilizada no modelo proposto.

Os diferentes estados descritos no trabalho são:

- a) ocioso: a máquina está ativa e pronta para trabalhar (falta de peças, bloqueada para a liberação de peças prontas);
- b) quebra: a máquina falhou em uma entre as diferentes maneiras que afetam a produção;
- c) *setup*: a máquina está mudando de ferramenta para processar uma nova peça;
- d) manutenção: a máquina está sendo reparada ou submetida a operações de manutenção programada; e
- e) trabalhando: a máquina está processando um trabalho.

Um *framework* para a gestão de energia avançada é descrito no artigo de Vikhorev et al. (2013), o qual permite que os gestores de energia, em todos os níveis, identifiquem os padrões de uso de energia em diferentes formas de análise em sua fábrica e, assim, possam tomar decisões significativas com base em indicadores de desempenho que sejam identificados como relevantes. O uso de indicadores de desempenho na condução do estudo de eficiência energética foi a característica selecionada desse artigo.

O objetivo do trabalho de Carvalho (2015) é propor um método para avaliação e aumento da eficiência energética de sistemas flexíveis discretos na manufatura de usinagem. O trabalho propõe três indicadores que podem ser utilizados como parâmetros de avaliação de eficiência energética, dos quais o segundo será utilizado no modelo proposto. Estes foram utilizados no modelo proposto, a saber:

- a) kWh/kg: quantidade de kWh gasto para cada kg de material removido na usinagem;
- b) kWh/peça: quantidade de kWh gasto para cada peça produzida;
- c) \$Energia/\$/Total: custo com energia em relação ao custo total.

Por fim, o último modelo no qual esse trabalho baseou-se é o modelo de Gomes (2015). O autor utiliza a simulação na busca da melhoria de eficiência energética. Gomes (2015) propõe um modelo de melhoria contínua, no qual as características da linha são simuladas, a fim de buscar melhorias no uso energético de uma linha existente.

#### **4.1.2 Proposta de modelo**

Baseando-se nas características estabelecidas nos trabalhos anteriormente citados, propôs-se um modelo para a melhoria da eficiência energética em uma linha de usinagem nova.

A execução de etapas iterativas, descritas a seguir, culminaram na construção do modelo proposto.

A primeira etapa do modelo consistiu na construção do estudo do estado atual. Esse processo teve início com a análise da linha atual. Para tanto, fez-se necessária a coletas de dados, imprescindível para a montagem da simulação da linha. Seguiu-se, então, o levantamento de parâmetros, tais como: tempos de ciclo, tempos de quebra e reparo de máquinas, tempos de *setup* de ferramentas, bem como outros dados que pudessem vir a auxiliar na elaboração da simulação. Para testar o modelo, foi necessário o uso de um software que suportasse os dados de fluxo da linha: o *Witness*.

Após a conclusão desses processos, foi necessário verificar se a simulação refletia um cenário próximo da realidade, para que os experimentos realizados nas linhas fossem considerados precisos. Diversos ajustes foram efetuados até que a simulação se tornasse uma representação mais próxima da realidade da linha real. Quando a simulação foi considerada como validada, seguiu-se para o estudo do estado futuro.

Na segunda etapa, o estudo do estado futuro, foram levantadas as mudanças que a linha iria sofrer, por meio das informações sobre as alterações a serem implementadas. Em seguida, foi efetuada a coleta dos dados que seriam utilizados nessa linha futura. Levando-se em consideração o fato da linha não existir ainda, foi necessário coletar os parâmetros com dados advindos da configuração inicial das máquinas, passados pelos fornecedores.

Com base nessas premissas, pôde-se fazer a construção da simulação do estado futuro da linha. Como as mudanças ainda não estavam implementadas, a simulação envolveu também alterações no *layout*, na quantidade de máquinas e na programação das máquinas, o que possibilitou a verificação de possíveis mudanças antes da sua efetiva implementação.

Após a validação da simulação, que é realizada verificando se o rendimento operacional da linha está conforme o estabelecido pela equipe de engenharia, verificando sua conformidade com o projeto em termos de fluxo de produção, foi possível realizar os experimentos de cunho energético. Para isso, foram verificados os gastos energéticos, de acordo com os estados das máquinas, e utilizado um dos indicadores estabelecidos por Carvalho (2015) para analisar os impactos de cada uma das mudanças na linha.

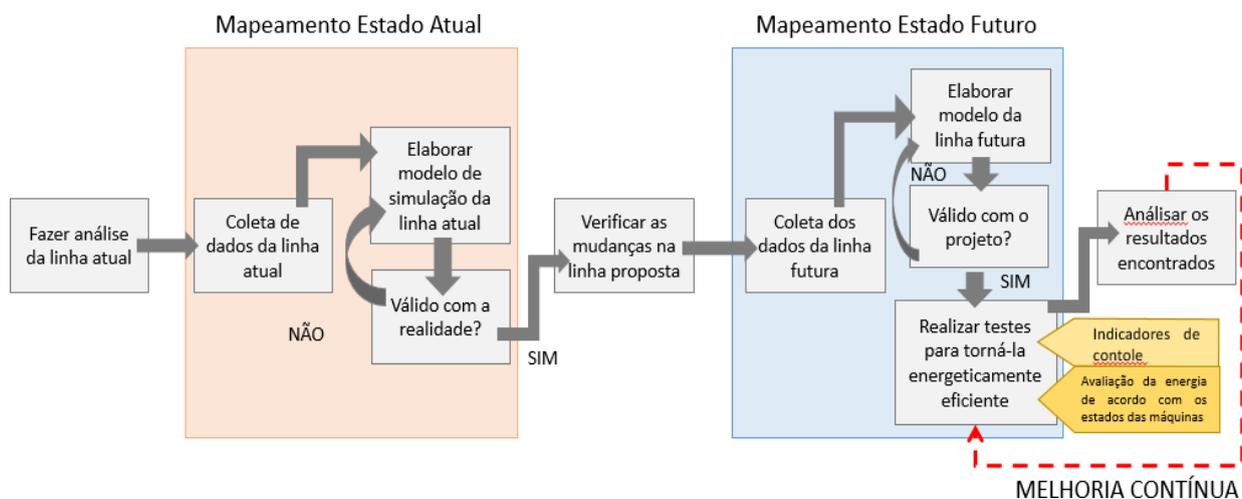
Reiterando o modelo proposto por Tanaka (2008), na Figura 2, o indicador utilizado se encontra, no contexto de medida e índice, no uso de energia unitário por produtividade, tendo como objeto uma linha de produção dentro da fábrica, gerando o tipo de decisão de estratégia de construção de entidades individuais para poupar energia.

Para a etapa do estado futuro, foi utilizado um segundo software de simulação, o qual aceitava dados e gerava cálculos de energia: o *Plant Simulation*. Este software permite inserir dentro de seus parâmetros o consumo energético em cada um dos estados da máquina, gerando um cálculo do consumo energético pelo tempo em que cada máquina fica em cada um desses estados.

Os resultados obtidos foram então analisados visando a verificar o impacto das mudanças no consumo de energia. E, como última fase, verificaram-se as possibilidades para aprimorar as melhorias, gerando um ciclo contínuo de testes de melhoria e análise dos resultados.

O modelo completo pode ser visto na Figura 6, a seguir:

Figura 6 - Modelo para gestão energética em um projeto futuro



Fonte: a autora, 2017.

## 5 APLICAÇÃO DO MODELO

Para a realização do experimento com o uso dos softwares de simulação, foi utilizado o modelo estabelecido pela autora dessa dissertação.

Para a primeira fase, que consistia em fazer a modelagem do estado atual da linha de usinagem existente, foram seguidos os seguintes passos.

Primeiramente, foram coletados os dados que impactavam no fluxo do processo da linha. Em seguida, foi elaborado um esboço de como essa linha funcionava no software de simulação: por onde as peças passavam, quanto tempo ficavam em cada máquina para serem trabalhadas (tempo de ciclo), o tamanho das esteiras, etc.

Em um segundo estágio, a fim de se obter uma linha mais próxima à realidade, foram inseridos os dados relacionados à quebra e aos ajustes nas máquinas. Foram inseridos no programa os dados que identificam de quanto em quanto tempo a máquina quebra, quanto tempo demora para o reparo ser realizado e de quanto em quanto tempo a máquina precisa realizar um *setup* de troca de ferramentas.

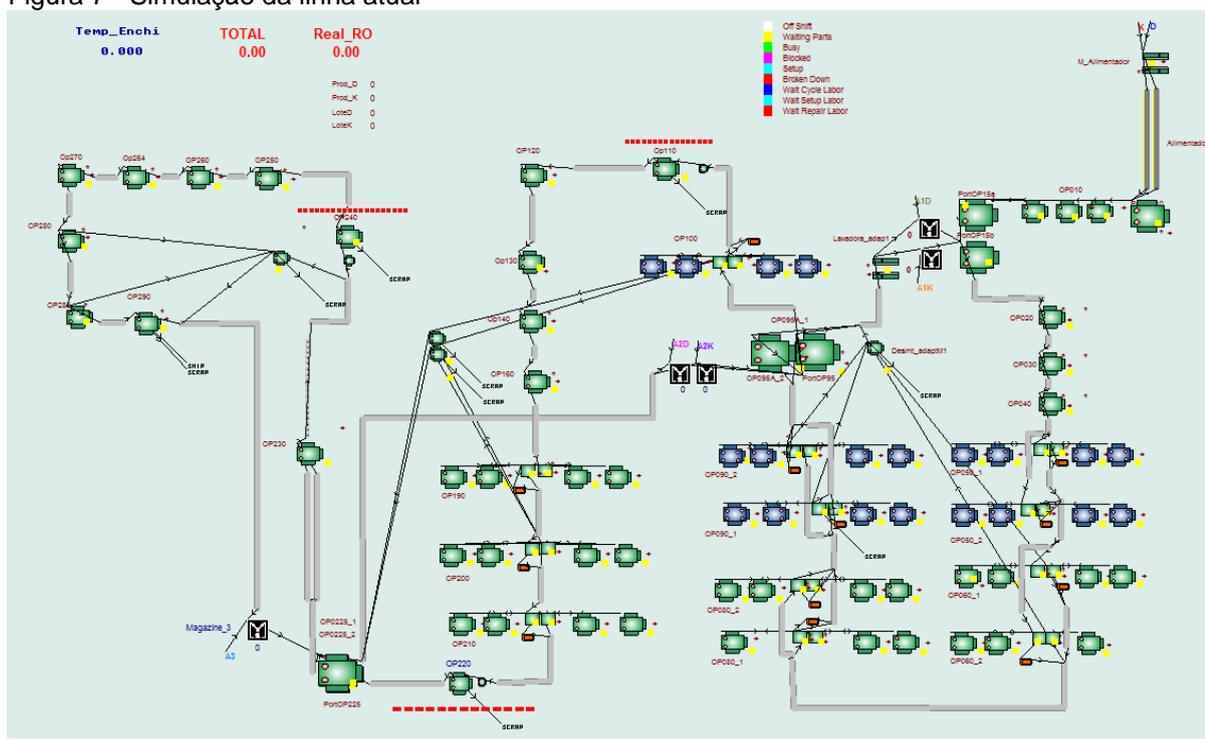
Por fim, o último dado inserido foi o controle de qualidade das peças. A abordagem foi na forma de postos para onde, após um certo número de operações, uma das peças era enviada para que o teste de qualidade fosse realizado. Outra regra estabelecida no software foi a taxa de descarte de peças, realizada em determinadas operações. A Figura 7, mostra a simulação da linha atual no software.

Após a realização da programação da simulação, foi possível gerar resultados de análise, como a taxa de uso das máquinas, identificar os gargalos da produção e, o mais relevante, verificar se a linha estava operando de acordo com a linha real, indicativo da taxa de rendimento operacional (RO).

Com o cálculo do RO foi possível observar se o que havia sido modelado mostrava-se compatível com a realidade, pois esse era um dado controlado pela linha de produção com frequência.

Se o RO da simulação estivesse muito distante do que estava sendo medido na realidade, seria necessário voltar à modelagem e identificar o que precisava ser refinado na simulação.

Figura 7 - Simulação da linha atual



Fonte: *Witness*, 2016.

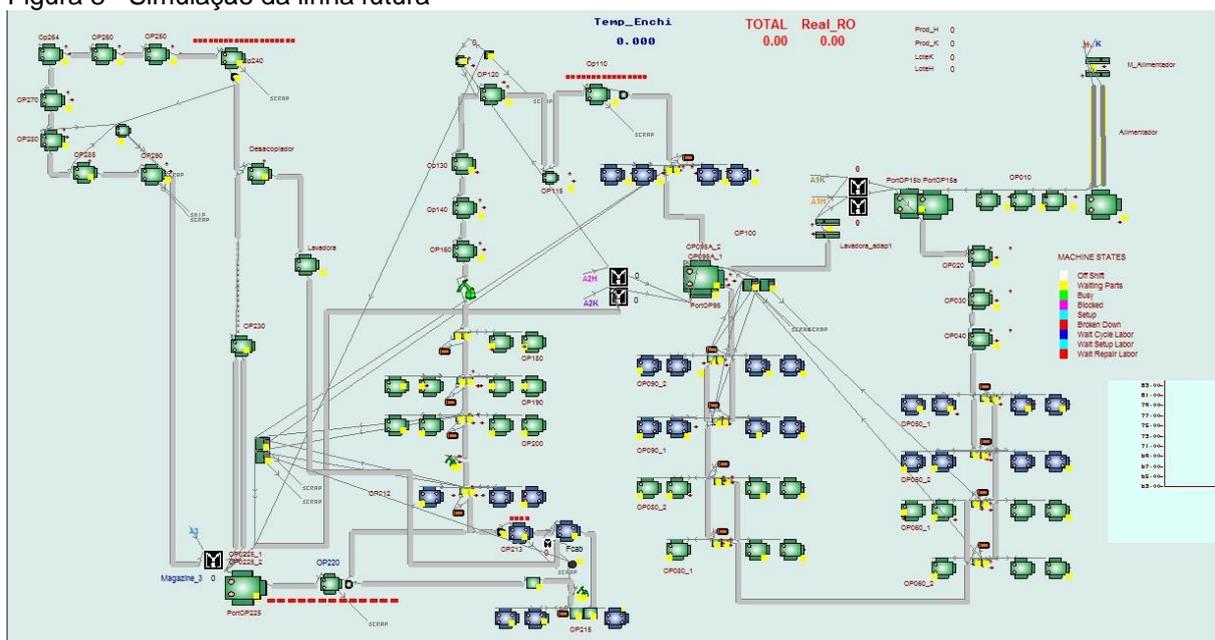
Quando o RO chegou no mais próximo possível da realidade (aceitável para uma variação de até 1,5%, definido pela equipe de engenharia), a simulação foi aceita como válida.

Passada a fase da elaboração da simulação da linha atual, foi necessário partir para a elaboração da linha nova, que se baseou na linha atual, porém, com algumas modificações no fluxo, além de uma área totalmente nova.

Cabe ressaltar que essa linha sofreu modificações, pois, um novo tipo de produto entrará na produção. A modificação na linha decorre do fato do novo produto ser feito de um material diferente do atual e, conseqüentemente, precisará de operações especiais em sua usinagem.

Usando-se como base a simulação da linha atual, foram realizadas as modificações para a linha nova. Estabeleceu-se o novo fluxo da linha, e os dados relativos a quebras, tempo de ciclo, *setups*, foram inseridos conforme definição dos fornecedores das máquinas. Na Figura 8, encontra-se a imagem da simulação já com as alterações da linha.

Figura 8 - Simulação da linha futura

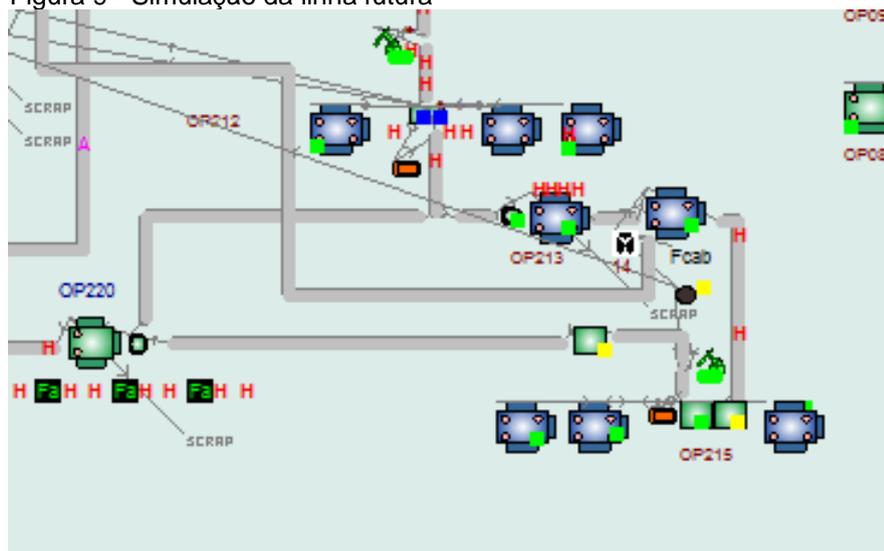


Fonte: *Witness*, 2016.

A mudança na simulação aconteceu a partir da OP 180, que passou a ter menos máquinas, vindas da antiga OP 210. Além disso, depois da OP 200, foram acrescentadas novas operações, destinadas à usinagem do bloco B.

Na Figura 9, as alterações realizadas nessa parte da linha aparecem em detalhes:

Figura 9 - Simulação da linha futura



Fonte: *Witness*, 2016.

Para essa fase, a avaliação da simulação foi feita da mesma forma que na simulação anterior, com exceção do fato que o RO de parâmetro de comparação foi definido pela equipe de engenheiros de processo que estavam trabalhando na implementação da linha.

Novamente, assim que o RO da simulação foi atingido, considerou-se que a simulação estava correta.

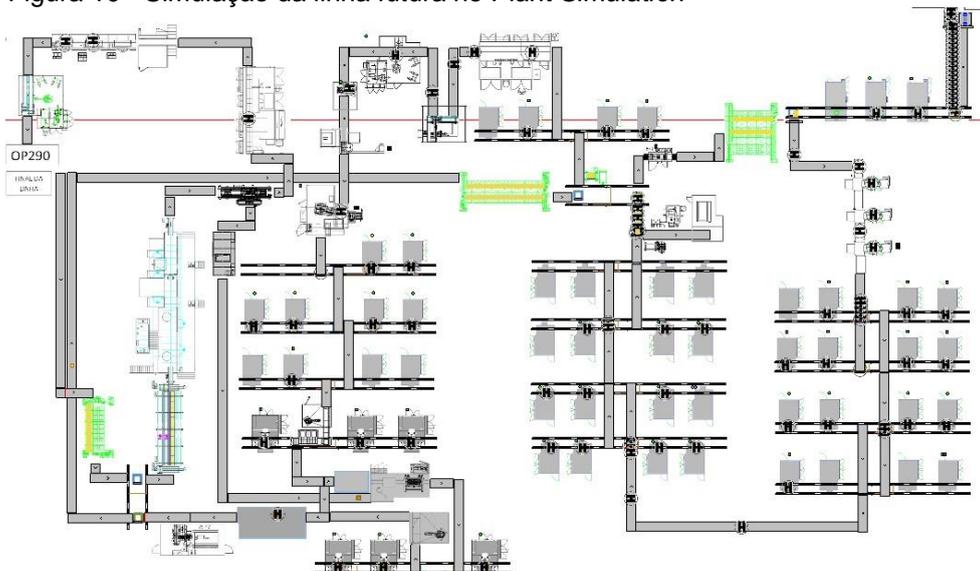
A partir dessa simulação, foi possível fazer diversos testes de fluxo na linha. Por exemplo, a equipe utilizou essa simulação para verificar a possibilidade de colocar AGVs (*Automatic Guided Vehicles* – Veículos automaticamente guiados) em uma área de abastecimento da linha, assim como, para identificar a melhor forma de colocar uma área de impregnação de peças na linha em questão.

Depois das simulações de fluxo realizadas no software *Witness*, a etapa seguinte consistiu na realização de testes energéticos na linha nova. Esses testes envolveram a realização de algumas modificações na linha e a aferição do quanto essas mudanças impactavam no consumo energético, pois, entende-se que o mapeamento desses impactos seja um recurso bom para gerar ações de economia de energia, por exemplo, em épocas de menor demanda na linha.

Para realizar os testes energéticos, foi necessário o uso de um outro software de simulação, o *Plant Simulation*. Nele, foi possível inserir os dados de energia de diversos estados das máquinas e, com isso, poder mapear tanto o consumo individual das máquinas como o da linha completa.

A simulação, usando o software *Plant Simulation*, foi elaborada de forma similar à simulação feita com o software *Witness*. A diferença entre elas residiu no fato do software *Plant Simulation* proporcionar a possibilidade de inserir os dados de energia das máquinas (Figura 10).

A simulação foi feita em uma planilha de dados, onde foram inseridos parâmetros que podiam ser alterados para posterior verificação dos impactos gerados. Conforme observado na Figura 11, a seguir, a planilha de dados foi elaborada de forma a permitir a alteração de diversos parâmetros, a saber: número de máquinas trabalhando, tempo de MTBF (*Mean Time Between Failure* – Tempo médio entre falhas) e tempo de MTTR (*Mean Time To Repair* – Tempo médio para reparo), disponibilidade das máquinas, tempo de ciclo e tempo de *setup*, taxas de refugo, frequência de *setup* das máquinas e, por fim, potência de cada operação em cada estado das máquinas.

Figura 10 - Simulação da linha futura no *Plant Simulation*

Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Os cenários experimentados na simulação da linha envolveram mudanças na quantidade de máquinas sendo utilizadas e alterações na variedade de produtos sendo usinados na linha. A descrição pode ser encontrada na próxima seção.

Figura 11 - Planilha de parâmetros

Operação	Quantidade e de	MTBF(min)	MTTR (min)	Disponibilidade (%)	Tempo de ciclo (min)	Tempo de Setup (min:seg)	Taxa de Refugo	Energy Working (kW)	Energy Setting-up (kW)	Energy Operational (kW)	Energy Failed (kW)	Energy Standby (kW)	Energy Off (kW)	Setup after parts
Esteiras		04:00:00	00:12:00	0.998003992	00:00:06	00:05:00		2,9	1	1	1	1	0,4	0
OP 005	1				00:00:00	00:05:00		2	2	2	2	2	0,4	0
Portal OP10	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:12	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 010	3	05:18:36	00:08:43	0.973359404	00:02:02	00:05:00	0.003473	9,5	5	5	5	5	0,4	255
Portal OP 015	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:42	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 020	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:41	00:05:00	0.005643	24,1	5	5	5	5	0,4	1200
OP 030	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:36	00:05:00		24,1	5	5	5	5	0,4	1800
OP 040	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:25	00:00:00		24,1	5	5	5	5	0,4	1800
Portal 050	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 050	8	03:28:12	00:05:27	0.97449099	00:05:27	00:05:00	0.014758	10,9	5	5	5	5	0,4	80
Portal 060	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 060	7	03:06:36	00:04:59	0.974005637	00:04:42	00:05:00	0.026478	9,2	5	5	5	5	0,4	324
Portal 080	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 080	7	03:34:12	00:05:35	0.974610975	00:04:47	00:05:00	0.024742	9,3	5	5	5	5	0,4	361
Portal 090	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 090	8	03:19:48	00:05:16	0.974301458	00:05:25	00:05:00	0.071622	9,8	5	5	5	5	0,4	200
OP 095	1	19:16:00	00:03:00	0.997411562	00:00:42	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
Portal OP 095	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:39	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
Portal OP 100	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:05:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 100	4	03:37:12	00:05:40	0.97460289	00:02:29	00:05:00	0.002604	9,7	5	5	5	5	0,4	400
OP 110	1	10:00:00	02:00:00	0.992063492	00:00:39	00:05:00		158,2	5	5	5	5	0,4	1000
OP 115	1	03:37:12	00:05:40	0.992063492	00:00:42	00:00:00		1	1	1	1	1	0,4	0
OP 120	1	11:13:00	00:08:36	0.987382629	00:00:41	00:05:00		2	2	2	2	2	0,4	0
OP 130	1	08:00:00	01:00:00	0.999875016	00:00:38	00:05:00		2	2	2	2	2	0,4	0

Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

As Figuras 7, 8 e 10 estão disponíveis em detalhes no Apêndice E, assim como a planilha de parâmetros apresentada na Figura 11, que está disponível na íntegra no Apêndice F.

## 5.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO

Para medir o efeito das mudanças de cunho energético na linha, foram realizadas alterações nos parâmetros da simulação e, posteriormente, verificados os impactos gerados nos resultados.

Cada um desses cenários gerou gráficos de como está o uso das máquinas, o quanto cada uma estava consumindo de energia e uma tabela com os consumos energéticos vinculados a cada estado da máquina. Os resultados foram gerados por meio de parâmetros definidos de potência de cada estado da máquina.

Depois de verificar os resultados gerados, foi utilizado um dos indicadores definidos por Carvalho (2015) para aferir o impacto gerado a cada mudança.

Nove testes foram efetuados, usando-se o software de simulação.

- a) cenário 1 – experimento para medir o gasto energético da linha com o *mix* de produtos “A” e “B”, com todas as máquinas trabalhando refletindo a operação da linha real, a fim de verificar o seu funcionamento e gerar parâmetros de comparação;
- b) cenário 2 – experimento para simular o fluxo da produção somente com peças “A” circulando na linha;
- c) cenário 3 – experimento para simular o fluxo da produção somente com peças “B” circulando na linha;
- d) cenário 4 – entre as Operações 50 e 90, simular a diminuição da quantidade de máquinas mantendo somente seis máquinas em operação;
- e) cenário 5 – experimento similar ao efetuado no cenário 2, com somente peças A circulando na linha, porém, desligando as máquinas que realizam operações somente em peças “B”;
- f) cenário 6 – experimento para simular a diminuição da quantidade de centros de usinagem operando entre as OP 100 e 212;
- g) cenário 7 – experimento para simular a diminuição da quantidade de máquinas em todas as operações que são centros de usinagem;
- h) cenário 8 – experimento para simular como ficaria a linha com somente cinco máquinas operando nas operações 60 e 80;
- i) cenário 9 – experimento para simular o acréscimo de uma máquina nas operações 60 e 80.

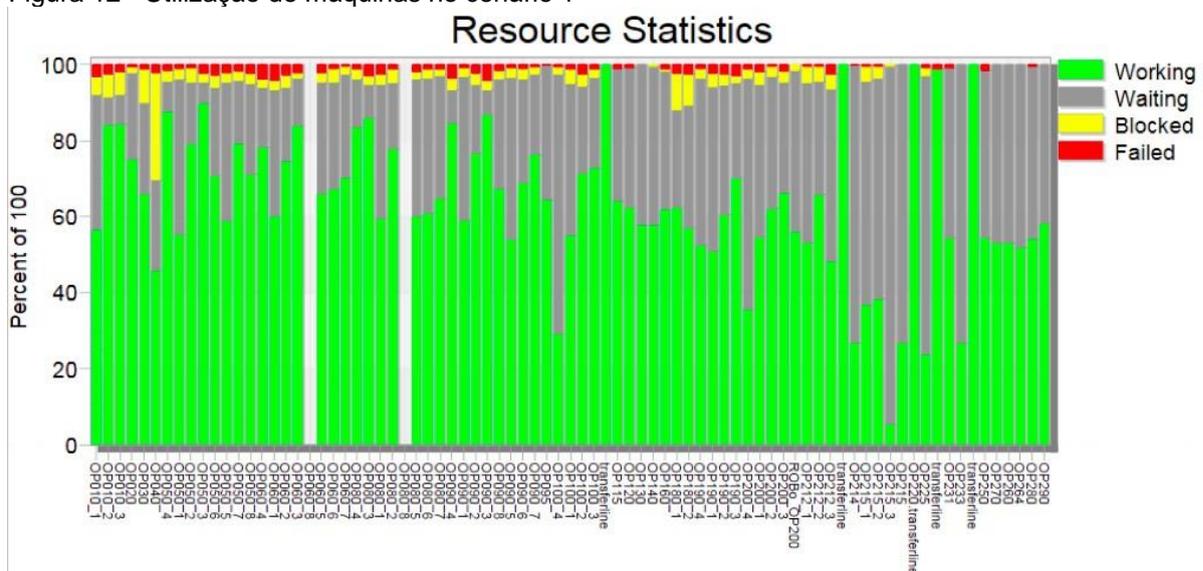
Esses cenários foram propostos visando a antecipar diferentes momentos, quando a demanda por determinados produtos pode crescer ou diminuir, gerando a necessidade de uso de um número maior ou menor de máquinas nas operações. Ademais, esses experimentos pretenderam mostrar as variações no consumo de energia nos diversos cenários, para servir de diretriz para ações futuras de melhoria, em direção a políticas de gestão da energia.

### 5.1.1 Cenário 1

O primeiro cenário, descrito como um experimento para medir o gasto energético da linha com as variedades de produtos “A” e “B”, com todas as máquinas trabalhando e, conseqüentemente, reproduzindo a operação da linha real, apresenta os seguintes resultados, os quais servirão de parâmetro de comparação com os experimentos subsequentes.

A produção, neste cenário, foi de 67 peças por hora. A Figura 12 mostra como as máquinas foram utilizadas e como foi a porcentagem de tempo em que as máquinas estavam nos seguintes estados: operando, esperando, bloqueadas ou em quebra.

Figura 12 - Utilização de máquinas no cenário 1

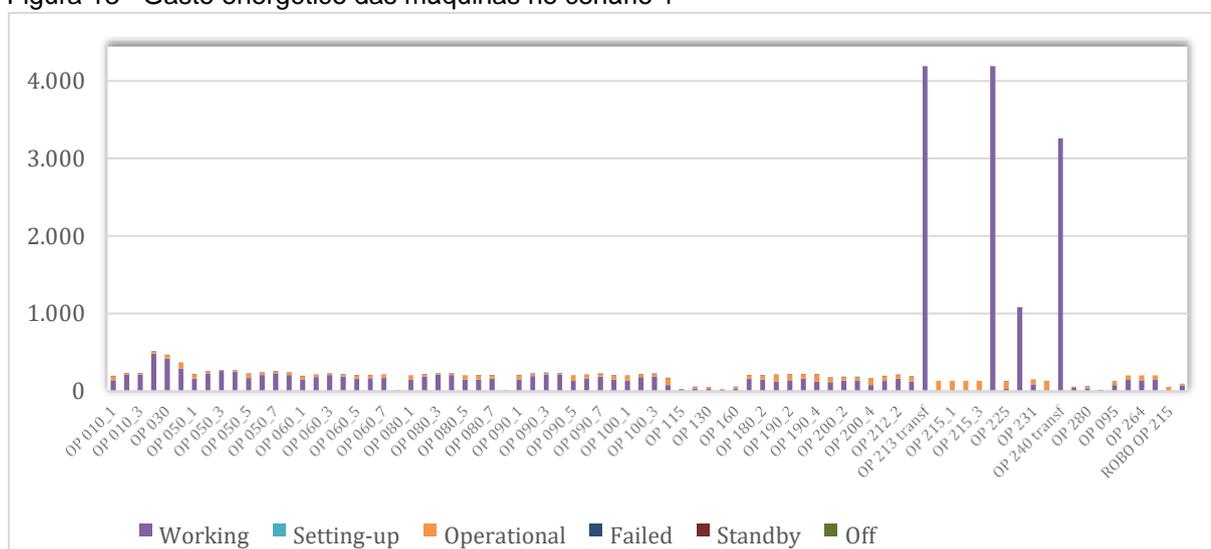


Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Nesse experimento destaca-se o fato das máquinas no circuito do produto “B” passarem uma parte significativa do tempo em modo de espera, ou seja, sem operar peças.

A Figura 13 mostra a distribuição do uso de energia elétrica da máquina, evidenciando o quanto cada operação gastou de energia, de acordo com o estado em que se encontrava. O gráfico mostra picos de consumo de energia em máquinas como as lavadoras, que tem como característica serem máquinas *transfer* – encarregadas das operações de transferência – as quais, por definição, não param de trabalhar mesmo na ausência de peças, distinguindo-se, por exemplo, de um centro de usinagem, que permanece em estado de operação quando não há peças. Outro fato verificado foi que muitas máquinas continuaram a consumir energia mesmo estando operacionais (ligadas, porém sem trabalhar uma peça).

Figura 13 - Gasto energético das máquinas no cenário 1



Fonte: a autora, 2017

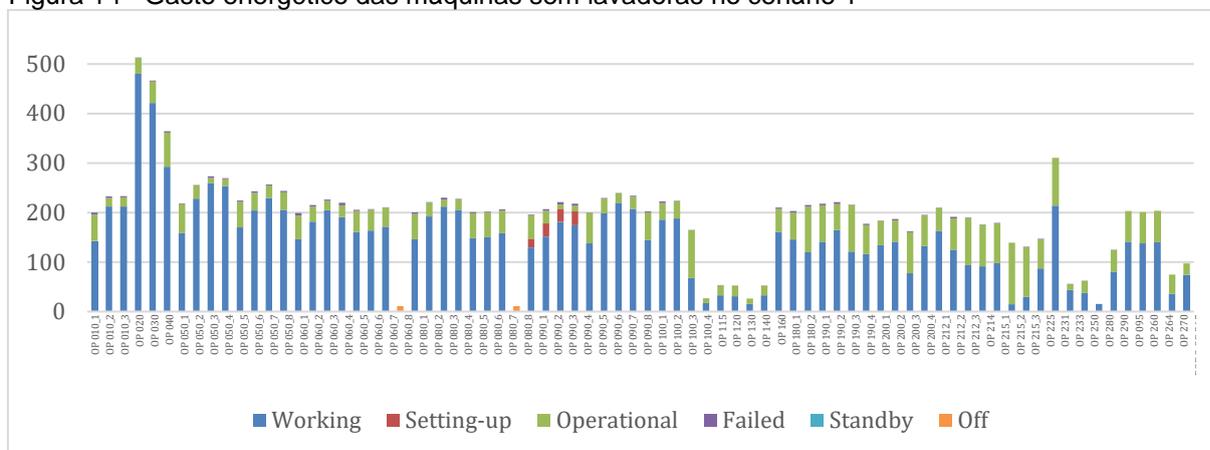
Para aprimorar a análise do gráfico, objetivando visualizar melhor o consumo de energia na linha, foram retirados os dados sobre o consumo das máquinas lavadoras. Levando-se em consideração que elas são *outliers* dentro do gráfico a sua retirada facilita a compreensão do consumo das demais máquinas (Figura 14):

Analisando-se as máquinas excetuando-se as lavadoras, conforme Figura 14, foi possível identificar que as máquinas que mais consomem energia são da OP 20 a 40, e a operação 230. Além disso, ficou evidente que a última máquina da OP 215 e a OP 225 encontravam-se ociosas.

O consumo total na linha, durante o período estabelecido na simulação, foi de 31576,89 kWh. Desse consumo, 3315,44 kWh foram identificados em máquinas

somente em estado operacional, ou seja, sem trabalhar em peças. Isso corresponde a 10,5% do gasto energético no período.

Figura 14 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 1



Fonte: a autora, 2017

O próximo passo foi realizar a análise desse estado de acordo com o indicador estabelecido por Carvalho (2015). Para o estudo em questão, o indicador utilizado, que serviu de meio para a comparação entre os cenários, foi o consumo de energia total na linha por peça produzida, conforme Equação 1.

$$\text{kWh por peça produzida} = \frac{\text{kWh total consumido na linha}}{\text{peças produzidas}} \quad (1)$$

Na simulação, durante o período em que a medição foi realizada – 24 horas – a quantidade total de peças produzidas foi de 1608 peças (67 peças por hora).

Utilizando-se a Equação 1 acima citada, o cálculo realizado foi de 19,64 kWh/peça (Equação 2):

$$\frac{31576,89 \text{ kWh}}{1608 \text{ peças}} = 19,64 \text{ kWh/peça} \quad (2)$$

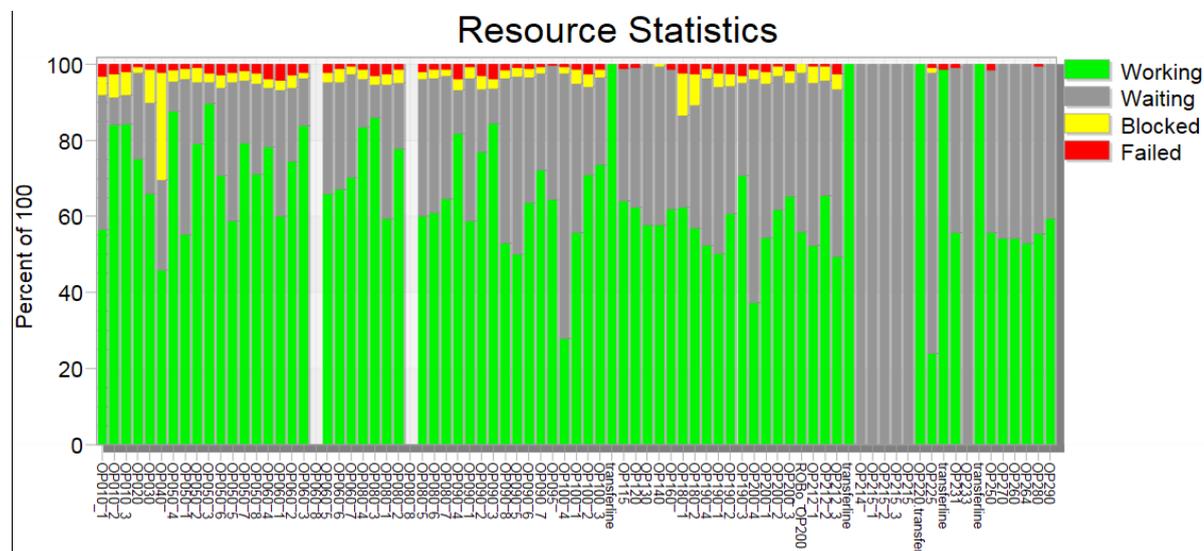
O cálculo desse indicador foi utilizado como parâmetro de comparação em todos os cenários.

### 5.1.2 Cenário 2

O segundo cenário estudado no software de simulação envolveu a circulação somente de peças “A” na linha de produção. Isso significa que não havia peças

entrando no circuito das OP 213-215. Na Figura 15, pode-se observar claramente que as operações citadas ficaram em estado de espera e nenhuma peça foi trabalhada.

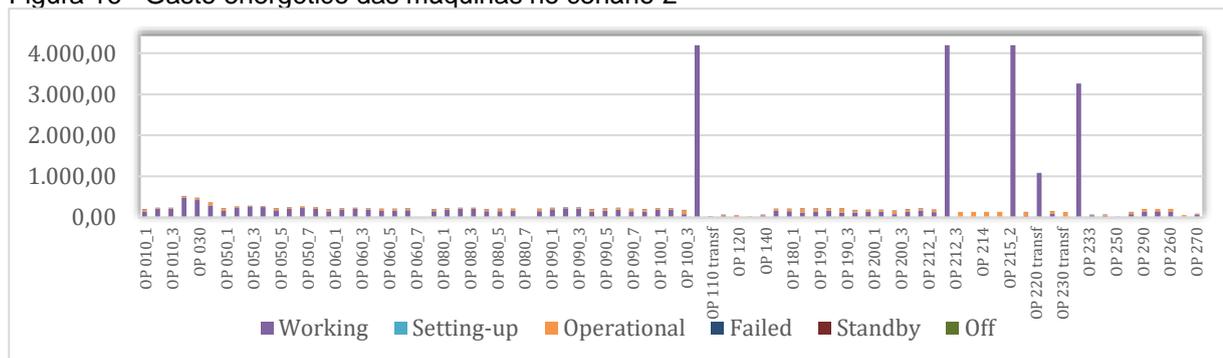
Figura 15 - Utilização de máquinas no cenário 2



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

No estudo energético desse cenário, novamente, a característica do maior consumo deu-se nas máquinas *transfer*, as lavadoras, conforme observa-se na Figura 16, abaixo:

Figura 16 - Gasto energético das máquinas no cenário 2

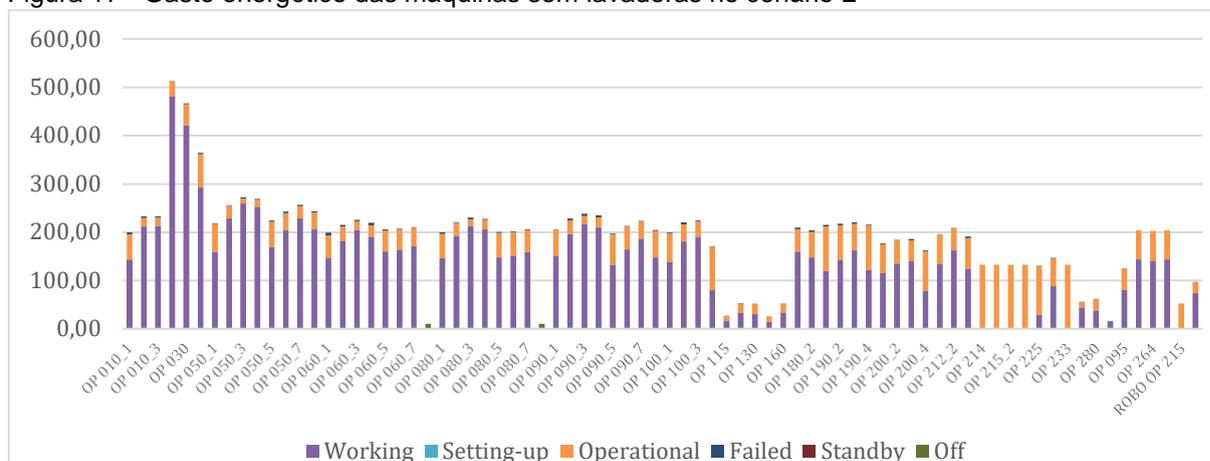


Fonte: a autora, 2017

Objetivando visualizar melhor o consumo das outras máquinas, os *outliers* também foram extraídos do gráfico (Figura 17). Com o gráfico sem as máquinas lavadoras, foi possível verificar que as máquinas desligadas apresentavam um consumo extremamente baixo de energia, porém, as máquinas do circuito onde circulam peças “B”, que neste experimento não estavam sendo produzidas, ainda assim apresentavam consumo de energia de modo operacional. Por isso, uma ação

a se tomar é verificar como seria esse cenário com as máquinas dessa parte da linha desligadas. Isso será verificado no cenário cinco, descrito adiante.

Figura 17 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 2



Fonte: a autora, 2017

Durante o período medido, a produção de peças foi de 68 peças por hora, totalizando as 1632 peças produzidas em 24 horas. O consumo de energia total foi de 31232,97 kWh, sendo observado um consumo de 3591,82 kWh (11,5% do total) nas máquinas em estado operacional.

Sendo considerados os valores anteriores, o cálculo do indicador de consumo por peça foi de 19,14 kWh/peça (Equação 3):

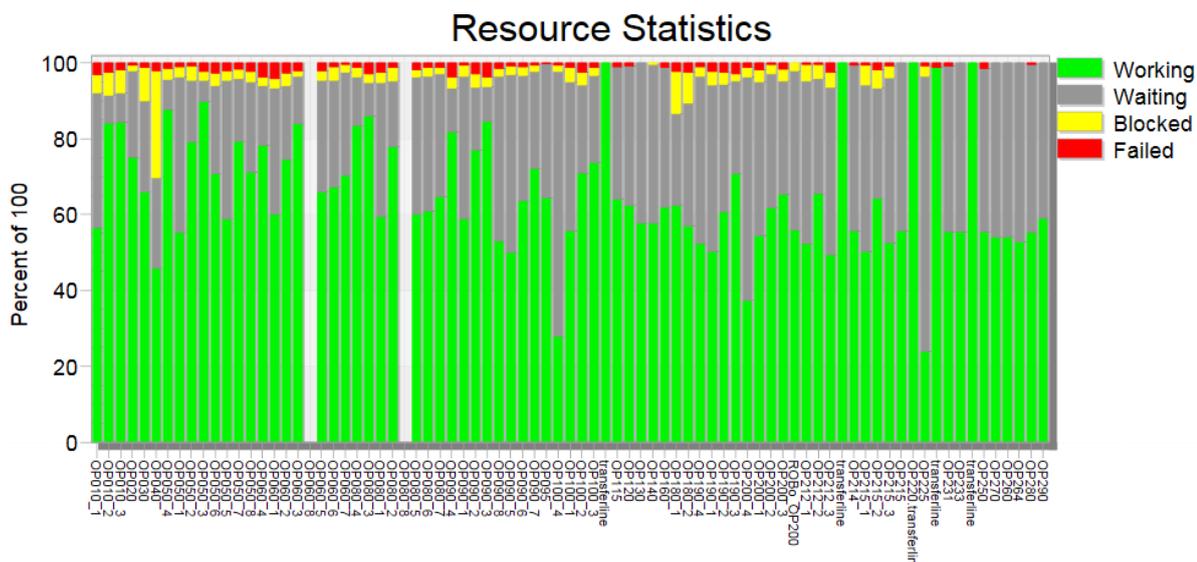
$$\frac{31232,97 \text{ kWh}}{1632 \text{ peças}} = 19,14 \text{ kWh/peça} \quad (3)$$

### 5.1.3 Cenário 3

O terceiro cenário estabelecido para realização dos experimentos foi a verificação de como a linha de produção se comporta quando há somente peças “B” circulando, ou seja, o circuito “B” também está sendo utilizado.

A Figura 18 mostra o uso das máquinas neste caso. Destaca-se no gráfico, o fato de que a principal alteração observada em relação ao cenário de *mix* de produção foi o aumento do uso das máquinas do circuito “B” (OP213 – OP215); as mesmas deixaram de ter tempo de espera.

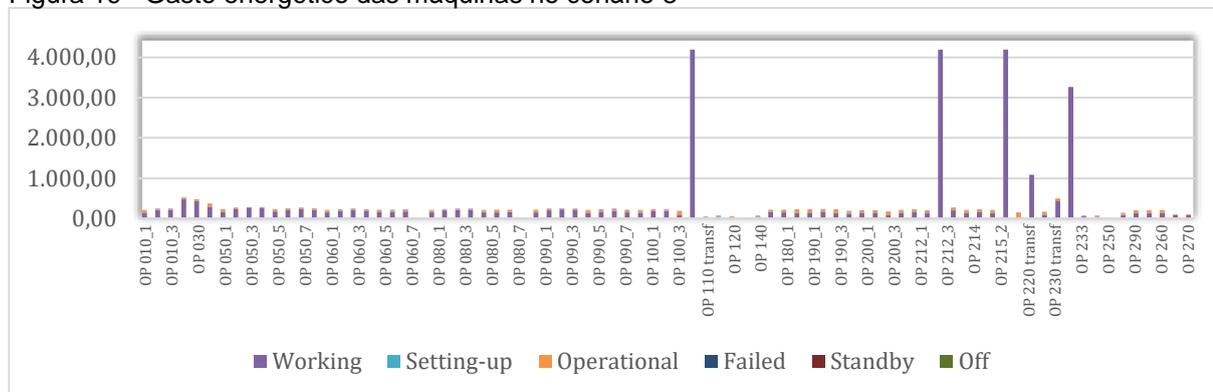
Figura 18 - Utilização de máquinas no cenário 3



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Assim como nos cenários anteriores, foram necessários dois gráficos para realizar a análise, um com e o outro sem o consumo das lavadoras, para melhor visualização (Figuras 19 e 20).

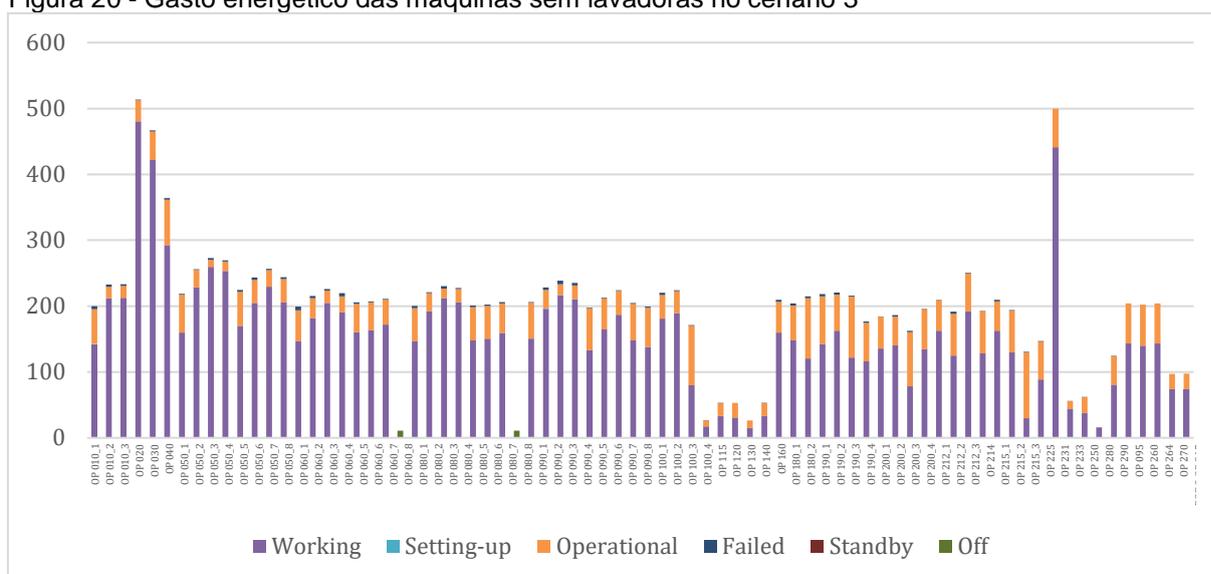
Figura 19 - Gasto energético das máquinas no cenário 3



Fonte: a autora, 2017

A análise energética da linha, para este cenário, mostra um crescimento no uso das máquinas nas operações que usam o bloco “B”, além de um grande crescimento no uso da OP 233, cuja operação é somente utilizada por esse tipo de bloco também.

Figura 20 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 3



Fonte: a autora, 2017

A quantidade de energia total gasta nesse período foi de 31961,17 kWh, com gasto somente em estado operacional de 3190 kWh, correspondendo a 10% do gasto total.

A produção de peças nesse cenário foi de 1632 peças em 24 horas, sendo produzidas 68 por hora. A análise do indicador de Carvalho (2015) gera o seguinte resultado (Equação 4):

$$\frac{31961,17 \text{ kWh}}{1632 \text{ peças}} = 19,58 \text{ kWh/peça} \quad (4)$$

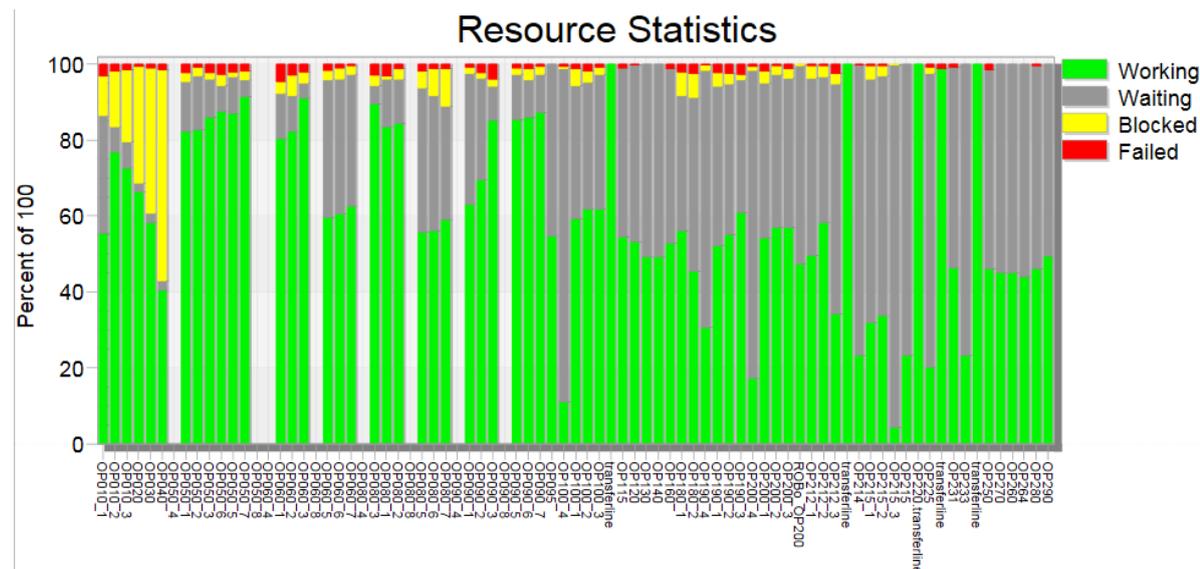
#### 5.1.4 Cenário 4

No quarto cenário, foram realizados estudos dentro das OP 50, 60, 80 e 90. Todas essas operações são centros de usinagem que fazem desbastes nas peças. As OP 50 e 90 atualmente possuem oito máquinas, e as OP 60 e 80, sete. O experimento realizado neste cenário foi para verificar como funcionaria a linha com somente seis máquinas ligadas em cada operação.

O impacto percebido neste cenário foi a diminuição da produção por hora. Foram produzidas um total de 1320 peças, sendo 55 por hora, contra as 68 peças do primeiro cenário. Isso significa que esse cenário só poderia ser utilizado em épocas em que a demanda da linha seja menor.

Nesse experimento, identificou-se um gargalo criado no começo da linha, como era de se esperar, pois, a linha estava operando com menos máquinas do que o planejado. As máquinas apresentaram um índice maior de bloqueios, porém trabalharam mais do que no primeiro cenário – cenário parâmetro. Já no final da linha, não foi observado um grande impacto no uso das máquinas (Figura 21).

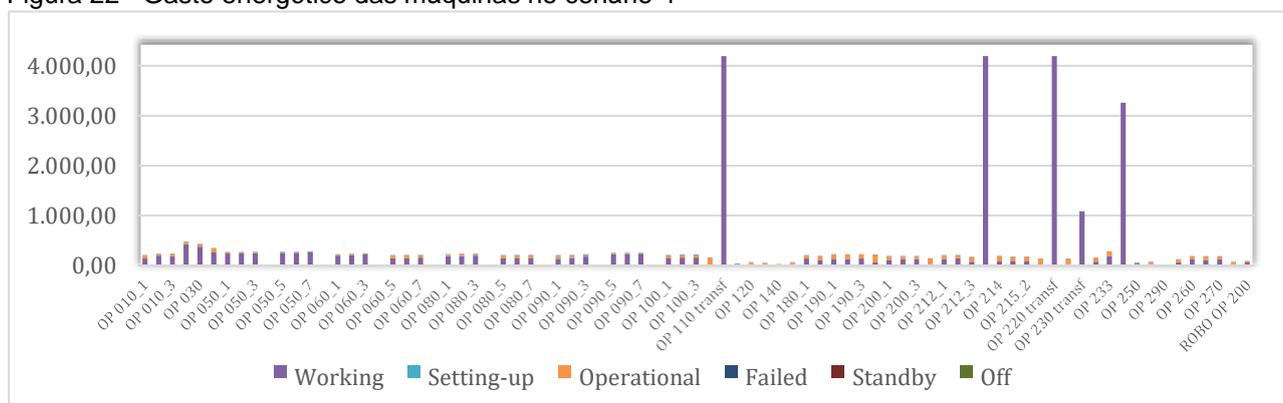
Figura 21 - Utilização de máquinas no cenário 4



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Em relação ao gasto energético, as lavadoras continuaram sendo as máquinas responsáveis pelo maior consumo de energia (Figura 22).

Figura 22 - Gasto energético das máquinas no cenário 4

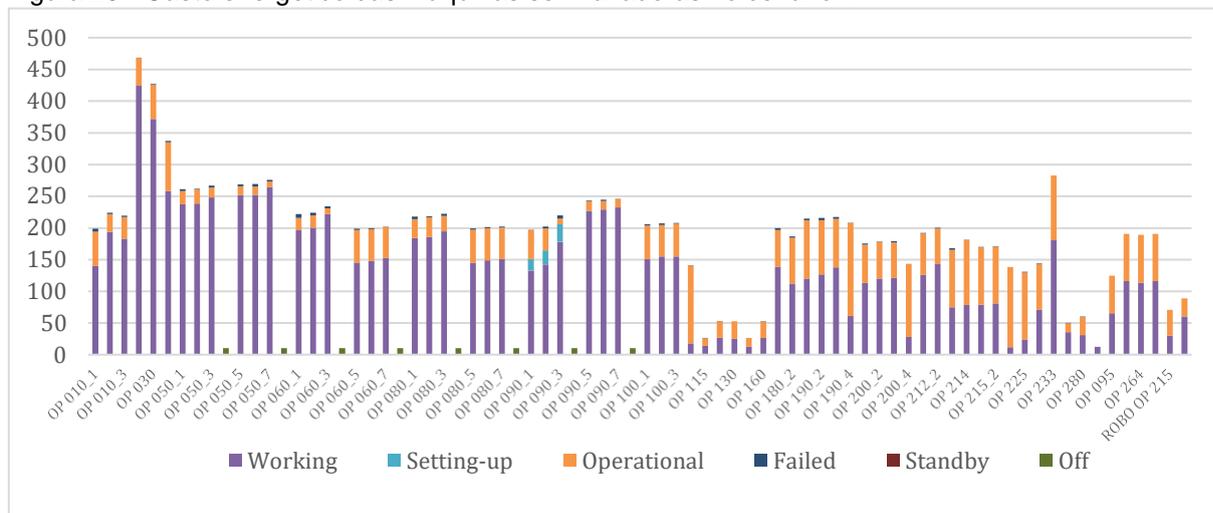


Fonte: a autora, 2017

Conforme pode ser observado na Figura 23, abaixo, o impacto gerado foi nas operações que sofreram alterações: OP 50, 60, 80 e 90. As demais máquinas que

ainda continuaram ligadas passaram a trabalhar mais, gastando mais energia trabalhando e menos em estado de espera.

Figura 23 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 4



Fonte: a autora, 2017

Isso causou uma redução no consumo de energia. Em relação ao estado inicial, identificado no primeiro cenário, o consumo de energia caiu de 31576,89 kWh para 30027,91 kWh. Já o consumo de energia em estado operacional foi de 3456,55 kWh (11,5% do total).

Quando o consumo por peça produzida foi calculado, o resultado aferido foi de 22,75 kWh/peça (Equação 5):

$$\frac{30027,91 \text{ kWh}}{1320 \text{ peças}} = 22,75 \text{ kWh/peça} \quad (5)$$

Verificou-se, portanto, que embora o consumo de energia total tenha diminuído, o consumo de energia por peça produzida aumentou.

### 5.1.5 Cenário 5

O quinto cenário simulado envolveu o uso somente de peças A, assim como no segundo cenário. Porém, diferentemente do experimento anterior, nesta simulação as máquinas que operavam somente o bloco “B” (das OP213 à 215), foram desligadas para economizar energia.

Durante esse experimento, a produção foi de 68 peças por hora, totalizando 1632 peças durante o período da simulação – 24 horas.

No gráfico que exibe o uso das máquinas, pode-se identificar as máquinas que foram desligadas, em que as operações não foram utilizadas. Elas aparecem indicadas com a cor branca na Figura 24.

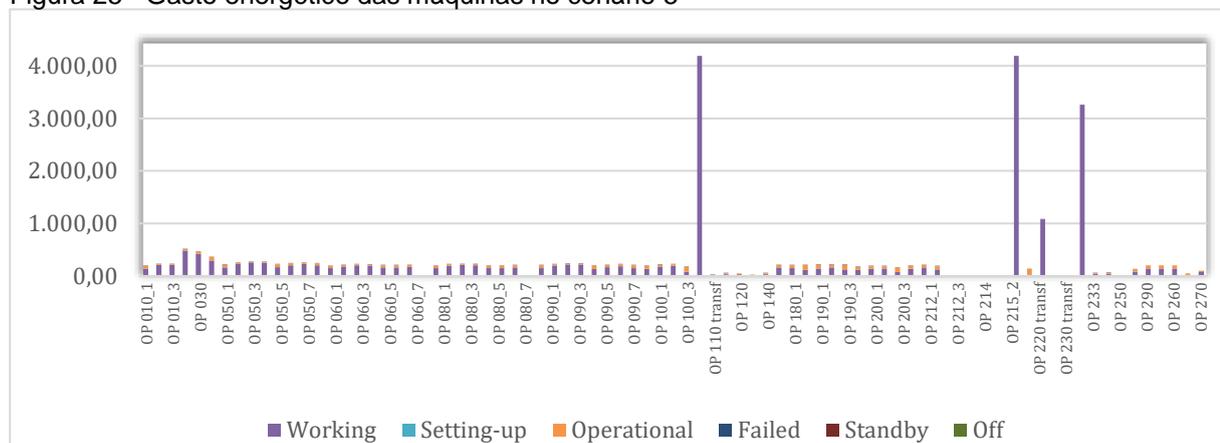
Figura 24 - Utilização de máquinas no cenário 5



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Em relação ao gasto energético, o que despertou a atenção foi o fato do consumo ter diminuído em decorrência do fato da OP 213 estar desligada. Por ser uma máquina de alto consumo, esta impactou diretamente no cálculo do consumo total, conforme pode ser observado na Figura 25.

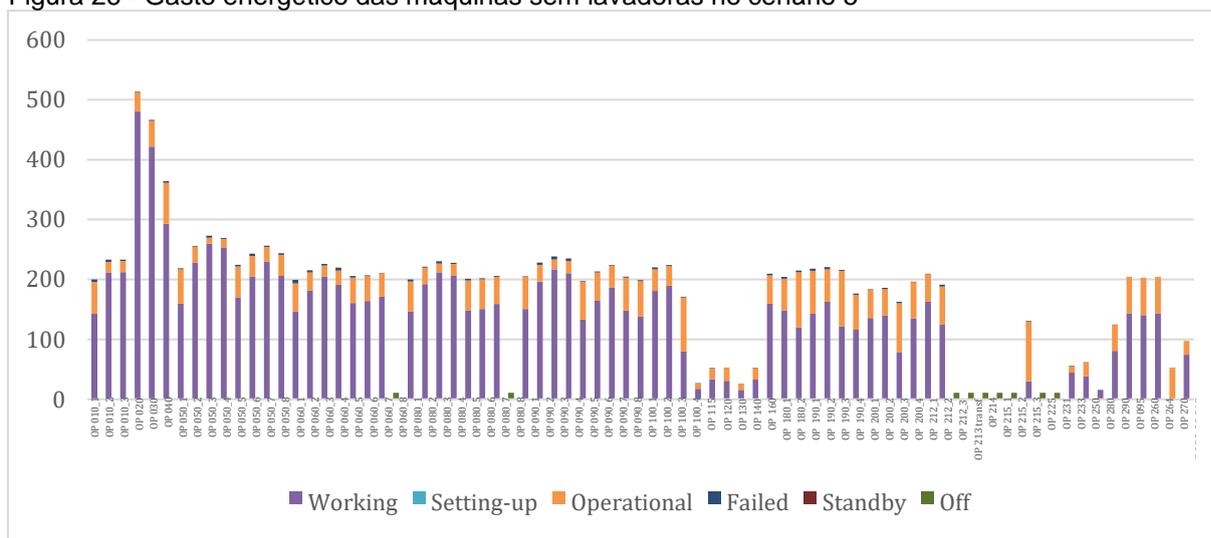
Figura 25 - Gasto energético das máquinas no cenário 5



Fonte: a autora, 2017.

Retirando-se as máquinas com maior consumo, as quais dificultam a visualização no gráfico, o que se destacou foi o baixo consumo das máquinas que estavam desligadas. Além disso, o impacto gerado no resto da linha não foi grande, pois ela continua funcionando normalmente para a produção do bloco “A” (Figura 26).

Figura 26 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 5



Fonte: a autora, 2017.

O consumo total, nesse caso, foi de 26.305,13 kWh, sendo desses, 2871,76 kWh consumidos em operações em estado de espera (10,91% do total).

O cálculo do indicador de consumo por peça foi de 16,12 kWh/peça (Equação 6). Nesse cenário, observou-se uma queda significativa no consumo de energia, especialmente por desligar uma das máquinas de maior consumo da linha.

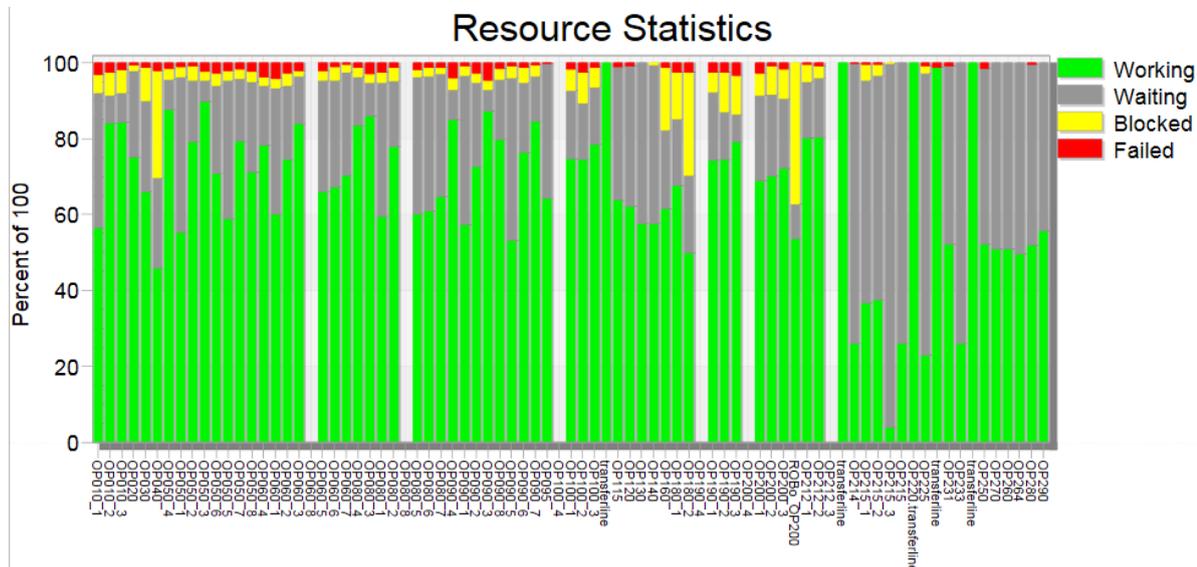
$$\frac{26305,13 \text{ kWh}}{1632 \text{ peças}} = 16,12 \text{ kWh/peça} \quad (6)$$

### 5.1.6 Cenário 6

No próximo experimento, foi efetuada uma análise do impacto na produção, diminuindo-se uma máquina em cada uma das seguintes operações: OP 100, 190, 200 e 212. A produção por hora baixou de 69 para 64 peças, totalizando 1536 peças produzidas durante as 24 horas, período da simulação. Em relação ao uso das máquinas, a diminuição na OP 100 não gerou grande impacto, pois a quarta máquina da operação no cenário parâmetro passa boa parte do tempo ociosa. Contudo, nas

demais operações, houve um maior bloqueio de fluxo gerado, especialmente no Robô após a OP200 (Figura 27).

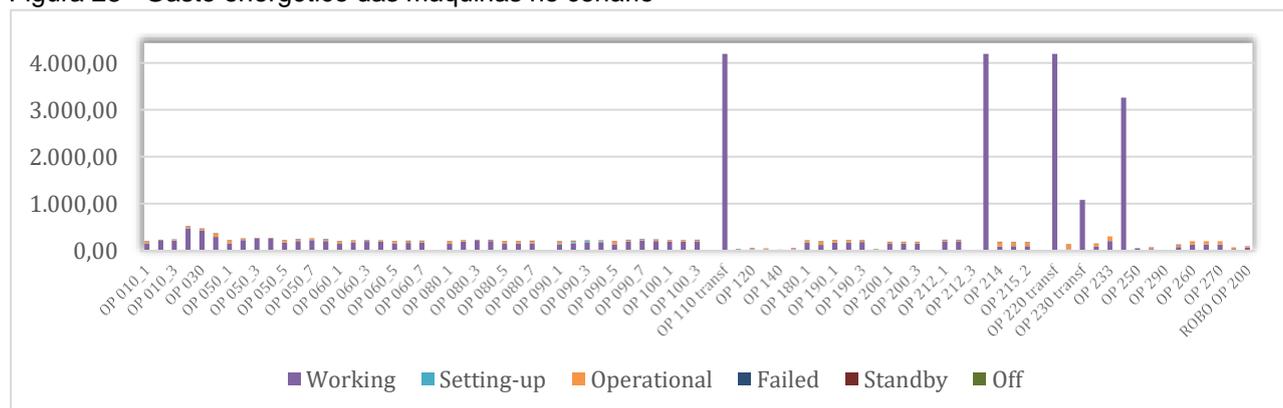
Figura 27 - Utilização de máquinas no cenário 6



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Nos experimentos relacionados à energia, percebe-se um aumento do consumo nas máquinas ligadas das operações que sofreram mudanças: OP 100, 190, 200 e 212 (Figura 28).

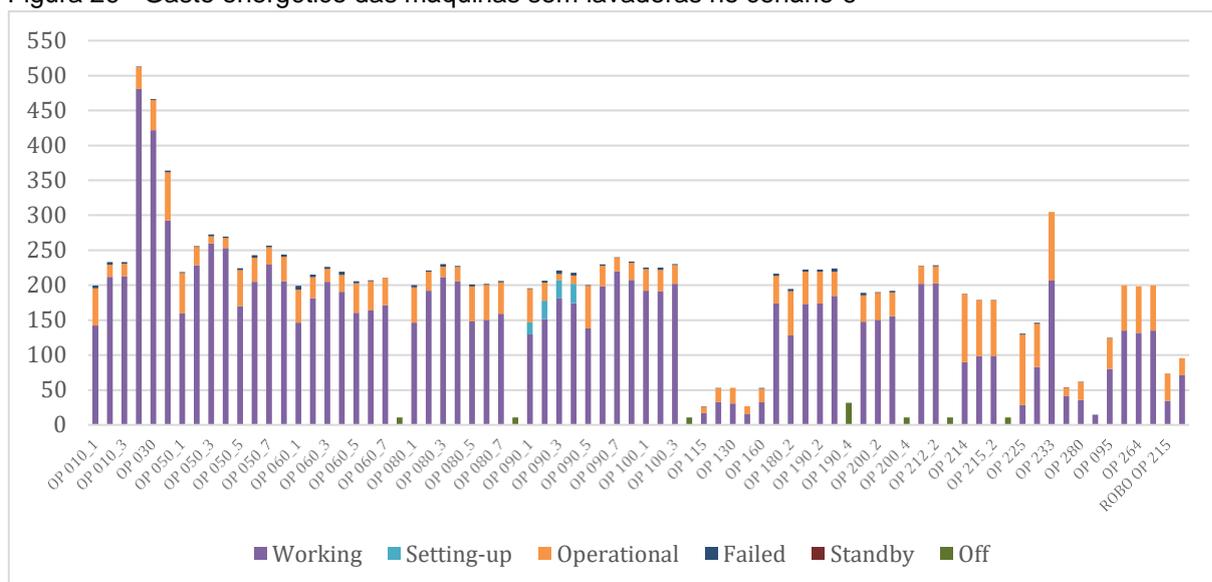
Figura 28 - Gasto energético das máquinas no cenário



Fonte: a autora, 2017.

Assim como ocorreu no cenário 4, as operações que sofreram mudanças passaram a apresentar menos tempo ocioso e passaram a ter mais gasto energético trabalhando (Figura 29).

Figura 29 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 6



Fonte: a autora, 2017.

Em relação ao consumo total, houve uma diminuição em relação ao cenário parâmetro, com um consumo energético total de 30877,87 kWh. O gasto das máquinas somente em estado operacional caiu também para 2646,13 kWh, correspondendo a 8,57% do total.

O cálculo de quanto foi gasto para produzir cada peça pode ser verificado na Equação 7.

$$\frac{30877,87\text{kWh}}{1536 \text{ peças}} = 20,10 \text{ kWh/peça} \quad (7)$$

Assim como ocorreu no cenário 4, apesar do consumo total ter sofrido um decréscimo, este consumo não foi proporcional à queda da produção de peças, fazendo com que o gasto energético por peça aumentasse.

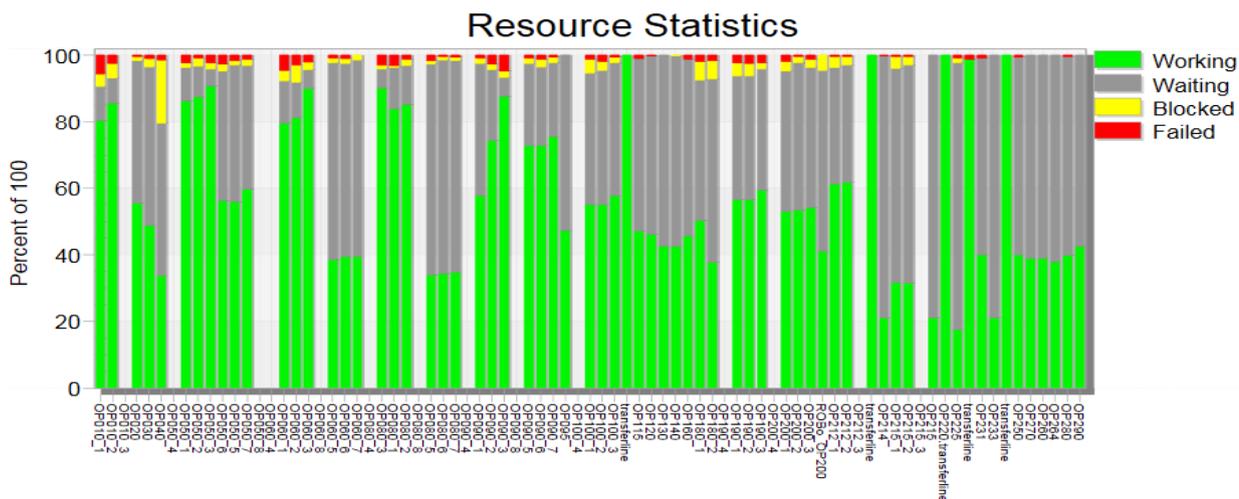
### 5.1.7 Cenário 7

O cenário 7 refletiu a união dos cenários 4 e 6, porém, com a diminuição de uma máquina por operação que funciona com múltiplas máquinas, que são os centros de usinagem da linha. Por exemplo, as operações OP 50 e 90 passaram de 8 para 7 máquinas, a OP 60 e a OP 80 passaram de 7 para 6 máquinas, a OP 200 de 4 para 3 máquinas ativas e assim por diante.

A produção no cenário em questão caiu para 49 peças por hora.

O impacto gerado nas operações foi que nas OPs que operam com mais de uma linha de máquinas (da OP 50 à OP 90), houve uma sobrecarga no uso das máquinas da primeira linha, enquanto as máquinas da segunda linha ficaram mais liberadas. Quanto às demais operações, não foram identificados impactos significativos no uso das máquinas (Figura 30).

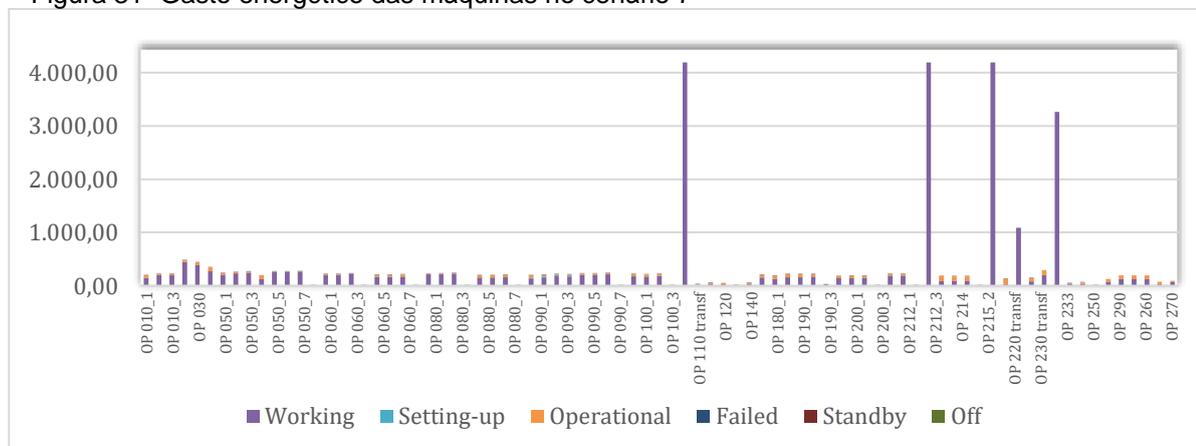
Figura 30 - Utilização de máquinas no cenário 7



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Com relação à energia, houve uma estabilização no consumo entre as máquinas ativas e uma diminuição nas máquinas inativas, ou seja, as máquinas que continuaram ativas passaram a consumir mais energia, enquanto o consumo das máquinas inativas foi insignificante (Figura 31).

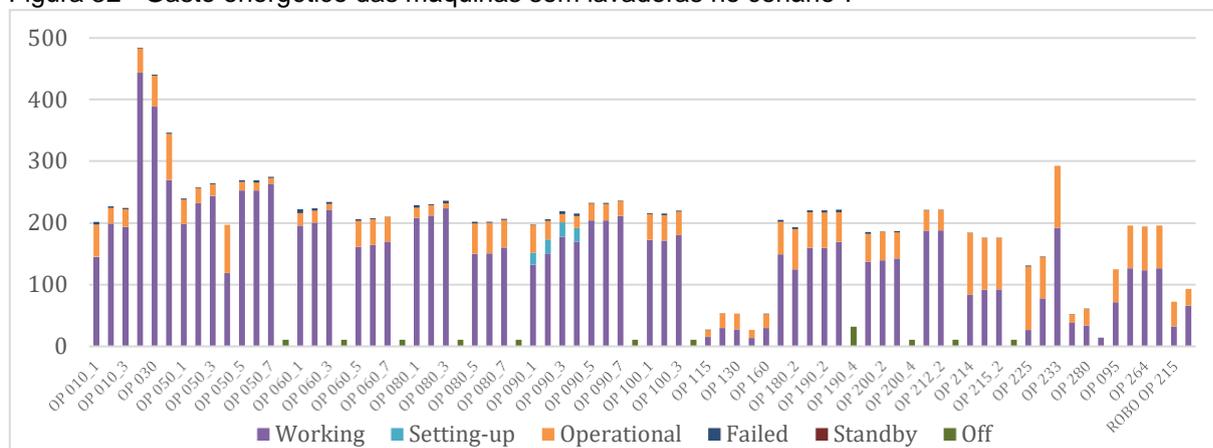
Figura 31- Gasto energético das máquinas no cenário 7



Fonte: a autora, 2017.

Vale ressaltar que esse tipo de configuração da linha não gerou grandes impactos no consumo de energia no final da linha, porém, causou impactos no fluxo da mesma (Figura 32).

Figura 32 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 7



Fonte: a autora, 2017.

O consumo total, nesse caso, foi de 29931,70 kWh, sendo que o consumo em máquinas em estado operacional foi de 2617,65 kWh (8,75%). Utilizando-se o cálculo do indicador, o consumo por peça pode ser verificado na Equação 8.

$$\frac{29931,70 \text{ kWh}}{1176 \text{ peças}} = 25,45 \text{ kWh/peça} \quad (8)$$

Aqui já se consegue estabelecer um padrão: quando a quantidade de produção diminui, a quantidade de energia total consumida é menor, contudo, o consumo energético por peça aumenta.

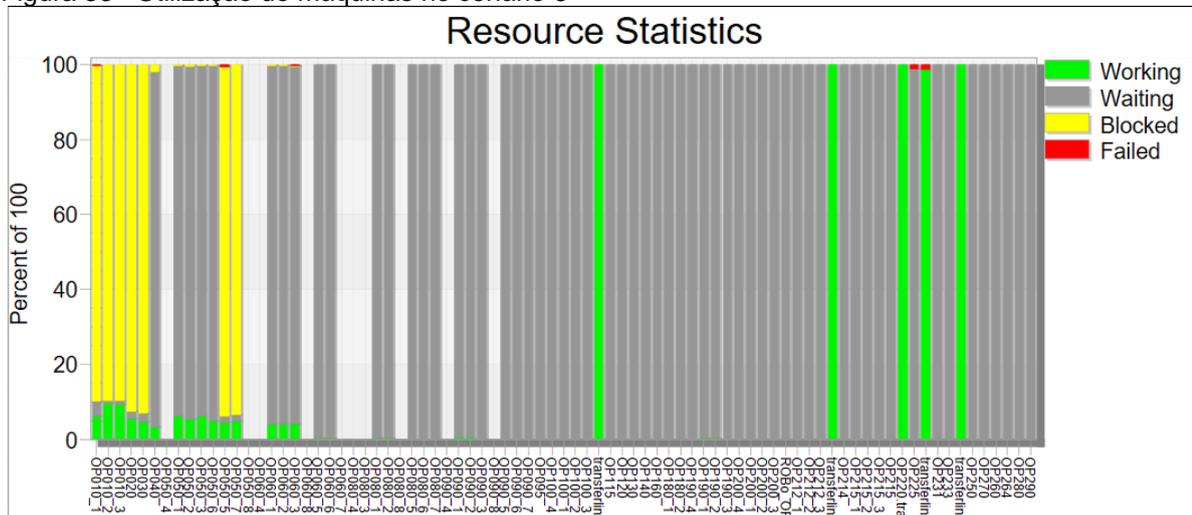
### 5.1.8 Cenário 8

O cenário 8 consistiu em uma diminuição ainda maior na quantidade de máquinas nas OPs 60 e 80, baixando a quantidade de máquinas para 5. Nesse cenário, entretanto, o fluxo de produção travou e a simulação criou um gargalo tão grande que não conseguiu ser levada adiante.

Pode-se verificar como ficou o gráfico dessa produção na Figura 33, a seguir. A produção ficou bloqueada já na primeira parte da linha e as peças não conseguiram fluir a partir da OP 60.

As únicas máquinas que “continuaram” em operação foram as lavadoras que, em teoria, não se desligam e, conseqüentemente, continuam acusando estarem trabalhando.

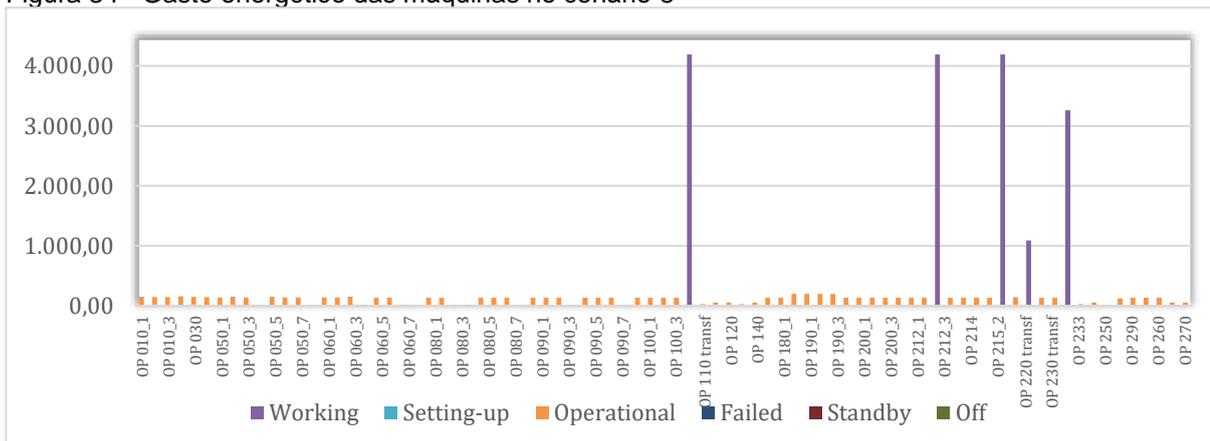
Figura 33 - Utilização de máquinas no cenário 8



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

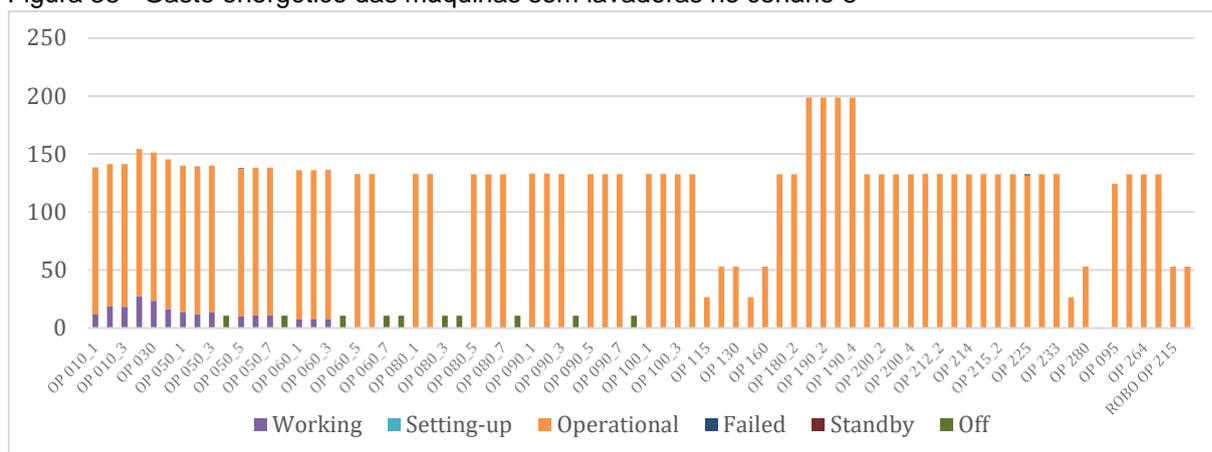
No consumo de energia, as máquinas ficaram funcionando em modo operacional e consumindo energia, conforme mostra os gráficos nas Figuras 34 e 35, abaixo:

Figura 34 - Gasto energético das máquinas no cenário 8



Fonte: a autora, 2017.

Figura 35 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 8



Fonte: a autora, 2017.

O consumo total, nesse caso, foi de 25229,04 kWh, que não pôde ser dividido para o cálculo do indicador, pois não houve a produção de peças prontas que possibilitassem o cálculo. O consumo de máquinas em modo operacional foi de 7980 kWh. Este número, que corresponde a 31,62% do total, só não foi maior devido ao fato da maior parte do consumo ter-se originado nas máquinas *transfer*, como aconteceu nos casos anteriores.

Os resultados mostram que o limite de número de máquinas para que linha consiga funcionar de forma sustentável é o apresentado no cenário 7. Uma maior redução no número de máquinas faz com que a linha pare.

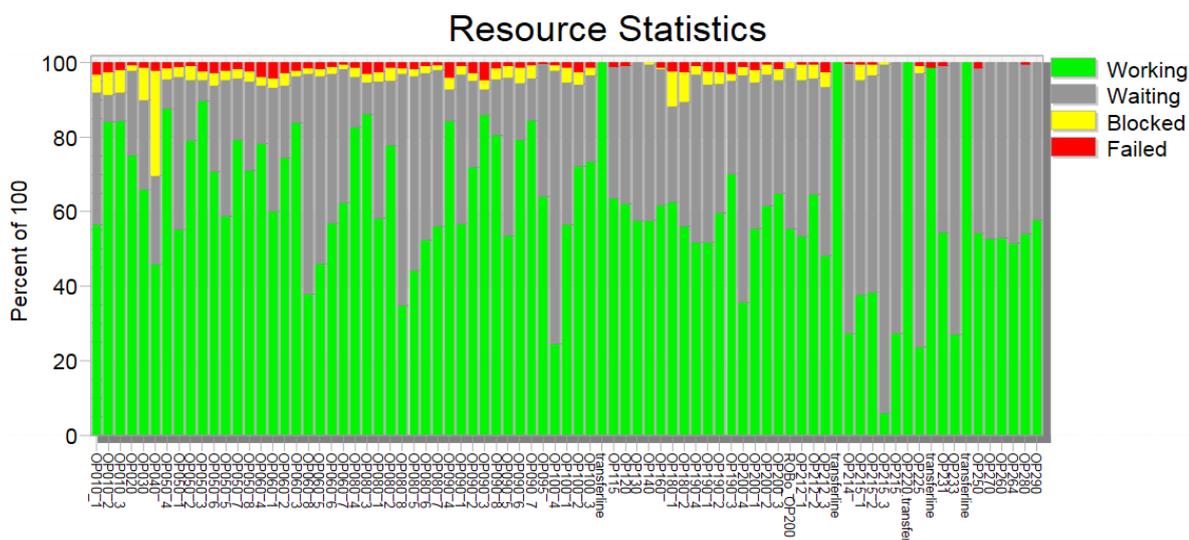
### 5.1.9 Cenário 9

Por fim, o último cenário estabelecido simulou o caso de ser necessário um aumento de produção na linha, o que ocorreria se fossem adquiridas novas máquinas para as OPs 60 e 80. Essa já foi uma possibilidade perscrutada pela empresa, por isso foi abordada nos experimentos realizados.

Em uma primeira análise, verificou-se que a taxa de produção não aumenta como o esperado. A produção passa a ser de 66 peças por hora, representando uma queda em relação às 67 peças do primeiro cenário.

Na análise do uso das máquinas, verifica-se que ambas ficaram trabalhando 40% do tempo, uma taxa aquém da esperada (Figura 36).

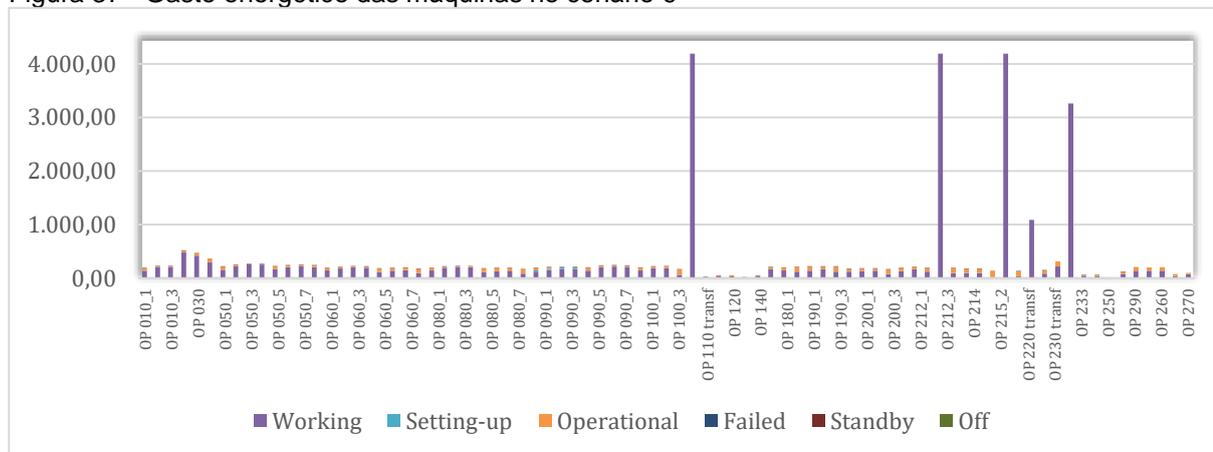
Figura 36 - Utilização de máquinas no cenário 9



Fonte: Plant Simulation, 2016.

Em relação ao gasto energético, as segundas linhas de máquinas das OP 60 e 80 apresentaram um incremento no consumo de energia (Figura 37).

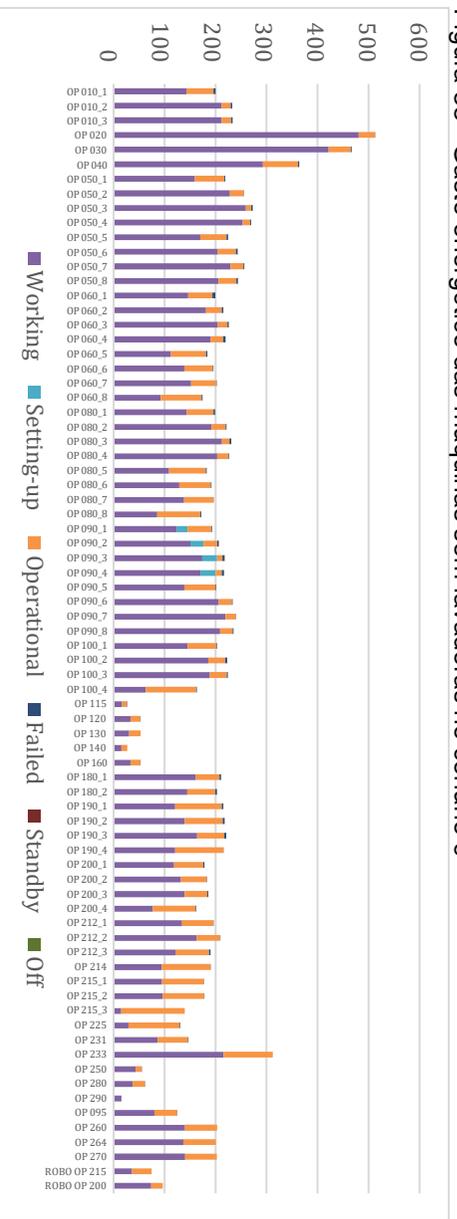
Figura 37 - Gasto energético das máquinas no cenário 9



Fonte: a autora, 2017.

A soma de gasto energético foi superior nas máquinas de 5 a 8 das operações 60 e 80, pois essas máquinas passaram a estar ligadas, e mesmo que as peças tenham começado a passar por elas, elas ficaram muito tempo em estado de espera também, portanto, consumindo energia (Figura 38).

Figura 38 - Gasto energético das máquinas sem lavadoras no cenário 9



Fonte: a autora, 2017.

No final, o consumo total de energia ficou em 31815,69 kWh, sendo 3581,04 kWh das máquinas em estado de espera (11,25% do total).

O cálculo do indicador mostra o consumo por peça (Equação 9):

$$\frac{31815,69 \text{ kWh}}{1584 \text{ peças}} = 20,09 \text{ kWh/peça} \quad (9)$$

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos nos experimentos, foi possível realizar uma comparação entre o primeiro cenário e os demais. O primeiro cenário foi utilizado como parâmetro por ser o cenário que reproduz a operação da linha real na empresa.

Para tanto, foi construída uma tabela que compara o consumo total de energia em cada cenário, o quanto dessa energia é operacional, ou seja, que é gasta com as máquinas ligadas em estado de espera, o indicador definido, o qual compara quanto é necessário de energia para produzir cada peça com a produção de peças em cada período simulado – 24 horas (Tabela 12).

Tabela 12 - Consumo total de energia por cenário

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 2</b>	31.232,97 kWh	3.591,82 kWh	19,14 kWh/peça	1632
<b>Cenário 3</b>	31.961,17 kWh	3.190,00 kWh	19,58 kWh/peça	1632
<b>Cenário 4</b>	30.027,91 kWh	3.456,55 kWh	22,75 kWh/peça	1320
<b>Cenário 5</b>	26.305,13 kWh	2.871,76 kWh	16,12 kWh/peça	1632
<b>Cenário 6</b>	30.877,87 kWh	2.646,13 kWh	20,10 kWh/peça	1536
<b>Cenário 7</b>	29.931,70 kWh	2.617,65 kWh	25,45 kWh/peça	1176
<b>Cenário 8</b>	25.229,04 kWh	7.980,76 kWh	-	0
<b>Cenário 9</b>	31.815,69 kWh	3.581,04 kWh	20,09 kWh/peça	1584

Fonte: a autora, 2017.

Para verificar como as mudanças propostas afetam o consumo energético, os oito cenários foram comparados com os parâmetros do primeiro cenário, cenário 1, apresentado no subcapítulo 5.1.1.

Os cenários 2 e 3 (subcapítulos 5.1.2 e 5.1.3) foram criados de forma similar, sendo que ambos se diferenciam por manter circulando somente um tipo de produto na linha: no primeiro somente o produto antigo, o bloco A, e, no segundo, somente o bloco B.

Justifica-se a relevância em se fazer esse tipo de medição, pois, apesar da linha de produção em questão ser totalmente flexível, suportando qualquer tipo de lote

de cada produto que a empresa deseje produzir, muitas vezes a demanda de um dos produtos pode vir a ser muito maior, possibilitando que a linha opere com a produção de somente um tipo de produto.

Entre os dois cenários, 2 e 3, foi especialmente importante o estudo do cenário 3 (subcapítulo 5.1.3), pois este aborda a possibilidade da produção do bloco antigo tornar-se cada vez mais escassa no futuro.

O cenário 5 (subcapítulo 5.1.5) apresentou o mesmo escopo do cenário 2 (subcapítulo 5.1.2), com a diferença de que, nesse caso, as máquinas não utilizadas na linha foram desligadas, gerando uma grande economia, que pode ser verificada nos resultados.

Para os cenários 4 e 6 (subcapítulos 5.1.4 e 5.1.6) foi diminuída a quantidade de centros de usinagem operando na linha, para verificar o quanto isso geraria de economia de energia e o impacto gerado no fluxo de produção. Como era de se esperar, a quantidade de peças produzidas em ambos casos diminuiu.

O cenário 7 (subcapítulo 5.1.7) foi uma continuidade dos dois cenários anteriores, os quais foram unidos para verificar o impacto gerado com o desligamento de várias máquinas. A quantidade de peças produzidas diminuiu ainda mais.

O cenário 8 (subcapítulo 5.1.8) foi simulado diminuindo-se ainda mais o número de máquinas do que no cenário 4 (subcapítulo 5.1.4) e o experimento do cenário 9 (subcapítulo 5.1.9), ao contrário, foi realizado aumentando-se a quantidade de máquinas e, em seguida, realizadas as medições.

Com as comparações estabelecidas, foi possível estimar a economia ou o incremento nos gastos em energia e o decorrente impacto financeiro para a empresa.

Seguem, a seguir, as análises entre cada um dos cenários, com exceção do cenário 8 (subcapítulo 5.1.8). Como, nesse caso, a linha travou, este cenário não foi analisado por ter sido considerado inviável.

## 6.1 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 2

A comparação entre o primeiro e segundo cenários evidencia que quando a produção é exclusivamente de peças A, a quantidade consumida de energia baixa em 343,92 kWh por dia. Entretanto, apesar do consumo ser menor, o gasto com as máquinas operando em estado de espera aumenta em 276,38 kWh.

Esse incremento no consumo deve-se principalmente ao fato das máquinas do circuito dedicado à peça B ficarem em modo de espera o tempo inteiro, sem produzir e sem sofrer variação de gasto energético.

Há um aumento na quantidade de peças A quando não é realizado o *mix* de produção, sendo que são produzidas 24 peças a mais.

Levando-se em conta que há um decréscimo na quantidade de energia consumida e um acréscimo na quantidade de peças produzidas, proporcionalmente, o consumo de energia por peça cai 0,5 kWh (Tabela 13).

Tabela 13 - Cenário 1 X Cenário 2

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 2</b>	31.232,97 kWh	3.591,82 kWh	19,14 kWh/peça	1632
<b>Diferença</b>	<b>- 343,92 kWh</b>	<b>+276,38 kWh</b>	<b>- 0,5 kWh/peça</b>	<b>+ 24</b>

Fonte: a autora, 2017.

De acordo com os dados da COPEL (2016), o custo de 1 kWh para as indústrias é de R\$ 0,64543.

Pode-se então calcular o quanto essa economia impacta no período de um dia (período estabelecido para a simulação) e no longo prazo (Equações 10 e 11).

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Economia diária} = 343,92 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 343,92 = \text{R\$ } 221,98 \quad (10)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas, ou seja:

$$\text{R\$}221,98 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 52.165,30 \quad (11)$$

Isso gera uma economia de R\$ 52.165,30 reais no ano.

## 6.2 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 3

O cenário analisado, em seguida, é o cenário 3 (subcapítulo 5.1.3). Nesse caso, em que somente as peças B estão circulando na linha, há um aumento no gasto energético de 384,28 kWh por dia. Isso ocorre pelo uso mais intenso das máquinas no circuito particular da peça B.

Por existir menos máquinas em estado de espera nesse mesmo circuito, a quantidade gasta em energia operacional cai em 125,44 kWh.

Apesar da quantidade de energia total ter aumentado nesse caso, o gasto de energia por peça diminui em função da maior quantidade de peças produzidas no período (Tabela 14).

Tabela 14 - Cenário 1 X Cenário 3

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 3</b>	31.961,17 kWh	3.190,00 kWh	19,58 kWh/peça	1632
<b>Diferença</b>	<b>+ 384,28 kWh</b>	<b>- 125,44 kWh</b>	<b>- 0,06 kWh/peça</b>	<b>+ 24</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equações 12 e 13):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Incremento no gasto diário} = 384,28 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 384,28 = + \text{R\$ } 248,03 \quad (12)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas.

$$\text{R\$ } 248,03 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 58.287,05 \quad (13)$$

Isso gera um acréscimo nos gastos com energia de R\$ 58.287,05 no ano.

### 6.3 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 4

Quando o cenário 4 (subcapítulo 5.1.4) é comparado com o cenário parâmetro, há uma melhora na quantidade de energia total gasta. O cenário gera uma economia de 1548,98 kWh. Entretanto, há um aumento de 141,11 kWh no consumo em máquinas em estado de espera.

Levando-se em consideração que nesse cenário as máquinas na linha são desligadas, a produção sofre um decréscimo de 288 peças, conseqüentemente, totalizando 1320 peças. Como a queda do consumo de energia não é proporcional à queda da quantidade de peças produzidas, o consumo de energia por peça aumenta 3,11 kWh (Tabela 15).

Tabela 15 - Cenário 1 X Cenário 4

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 4</b>	30.027,91 kWh	3.456,55 kWh	22,75 kWh/peça	1320
<b>Diferença</b>	<b>- 1548,98 kWh</b>	<b>+ 141,11 kWh</b>	<b>+ 3,11 kWh/peça</b>	<b>- 288</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equações 14 e 15):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Economia diária} = 1548,98 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 1548,98 = \text{R\$ } 999,76 \quad (14)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas.

$$\text{R\$ } 999,76 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 234.943,60 \quad (15)$$

Isso gera uma economia de R\$ 234.943,60 no ano.

#### 6.4 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 5

A quarta comparação foi entre o cenário parâmetro e o cenário 5 (subcapítulo 5.1.5), que assim como o cenário 2 (subcapítulo 5.1.2) consiste em limitar a produção ao produto A, com a diferença de manter desligadas as máquinas usadas exclusivamente pelo produto B.

Esse cenário é o que apresenta maior alteração em todas as medições, com uma diminuição de 5271,76 kWh no consumo total de energia e uma queda de 443,68 kWh no uso de energia em máquinas em espera. A quantidade de peças produzidas aumentou em 24 peças, e a energia gasta para produzir cada uma delas caiu 3,52 kWh.

Entre os cenários estudados, esse foi o que apresentou a maior diferença em relação ao cenário parâmetro, devido ao desligamento de várias máquinas, sendo uma lavadora de alto consumo (Tabela 16).

Tabela 16 - Cenário 1 X Cenário 5

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 5</b>	26.305,13 kWh	2.871,76 kWh	16,12 kWh/peça	1632
<b>Diferença</b>	<b>- 5271,76 kWh</b>	<b>- 443,68 kWh</b>	<b>- 3,52 kWh/peça</b>	<b>+ 24</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equações 16 e 17):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Economia diária} = 5271,76 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 5271,76 = \text{R\$ } 3.402,55 \quad (16)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas.

$$\text{R\$ } 3.402,55 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 799.599,25 \quad (17)$$

Isso gera uma economia de R\$ 799.599,25 no ano.

## 6.5 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 6

O comparativo com o cenário 6 (subcapítulo 5.1.6) apresenta uma queda sutil no consumo de energia, de apenas 699,02 kWh. Quando se observa a queda de uso de energia operacional, o valor da mesma é de 699,31 kWh, bem próximo do valor da diferença de consumo de energia total entre os dois cenários.

Isso ocorreu em função da economia da energia decorrente do desligamento de algumas máquinas. Contudo, esse desligamento fez com que as demais máquinas funcionassem mais em produção e passassem menos tempo em estado de espera.

Entretanto, essa mudança diminuiu a quantidade de peças produzidas para 1536, 72 peças a menos do que no primeiro cenário e aumentou em 0,46 kWh o consumo de energia por peça (Tabela 17).

Tabela 17 - Cenário 1 X Cenário 6

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 6</b>	30.877,87 kWh	2.646,13 kWh	20,10 kWh/peça	1536
<b>Diferença</b>	<b>- 699,02 kWh</b>	<b>- 699,31 kWh</b>	<b>+ 0,46 kWh/peça</b>	<b>- 72</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equações 18 e 19):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Economia diária} = 699,02 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 699,02 = \text{R\$ } 451,17 \quad (18)$$

Uma semana possui 5 dias úteis, e no ano são trabalhadas em média 47 semanas.

$$\text{R\$ } 451,17 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 106.024,95 \quad (19)$$

Isso gera uma economia de R\$ 106.024,95 no ano.

## 6.6 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 7

O penúltimo caso verificado, o cenário 7 (subcapítulo 5.1.7) só poderia ser colocado em prática no caso de uma demanda extremamente baixa. Nesse cenário, as máquinas são desligadas em duas áreas diferentes da linha e a produção de peças sofre um decréscimo de 432 peças, o que corresponde a uma queda de aproximadamente 27% na produção.

Observa-se uma queda no consumo de energia de 1645,19 kWh e uma queda de energia operacional de 697,79 kWh. A queda no consumo de energia novamente não é proporcional à queda no número de peças produzidas, fazendo com que o consumo de energia por peça aumente em 5,81 kWh (Tabela 18).

Tabela 18 - Cenário 1 X Cenário 7

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 7</b>	29.931,70 kWh	2.617,65 kWh	25,45 kWh/peça	1176
<b>Diferença</b>	<b>- 1645,19 kWh</b>	<b>- 697,79 kWh</b>	<b>+ 5,81 kWh/peça</b>	<b>- 432</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equação 20 e 21):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Economia diária} = 1645,19 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 1645,19 = \text{R\$ } 1061,85 \quad (20)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas.

$$\text{R\$ } 1061,85 \times 5 \times 47 = \text{R\$ } 249.535,75 \quad (21)$$

Isso gera uma economia de R\$ 249.535,75 no ano.

## 6.7 CENÁRIO PARÂMETRO X CENÁRIO 9

A última comparação gerada pela simulação foi entre o cenário parâmetro – cenário 1 (subcapítulo 5.1.1) e o cenário 9 (subcapítulo 5.1.9). Nesse caso, o resultado esperado era que o aumento da quantidade de máquinas em duas operações refletisse um aumento na produção. Entretanto, o que ocorreu foi o contrário, acarretando em uma redução de 24 peças produzidas no tempo total da simulação, ou seja, em 24 horas.

Essa diferença foi de 1,5%, o que pode ser decorrente de um erro natural da simulação. Entretanto, os resultados são indicativos de que a adição de novas máquinas não altera a produtividade. Consequentemente, o investimento no aumento da quantidade de máquinas torna-se desaconselhável.

Além disso, ocorre um aumento no consumo de energia total de 238,8 kWh e de energia operacional de 265,6 kWh, decorrentes do fato de haver duas novas máquinas operando na linha.

Por fim, o consumo de energia, por peça, aumenta 0,45 kWh/peça, passando a ser de 20,09 kWh (Tabela 19).

Tabela 19 - Cenário 1 X Cenário 9

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>
<b>Cenário 1 (parâmetro)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608
<b>Cenário 9</b>	31.815,69 kWh	3.581,04 kWh	20,09 kWh/peça	1584
<b>Diferença</b>	<b>+ 238,80 kWh</b>	<b>+ 265,60 kWh</b>	<b>+ 0,45 kWh/peça</b>	<b>- 24</b>

Fonte: a autora, 2017.

O impacto no custo da energia no período de um dia e no longo prazo são, respectivamente (Equações 22 e 23):

$$\text{R\$/kWh} = 0,64543$$

$$\text{Incremento no gasto diário} = + 238,80 \text{ kWh}$$

$$0,64543 \times 238,80 = \text{R\$ } 154,13 \quad (22)$$

Uma semana possui 5 dias úteis e no ano são trabalhadas, em média, 47 semanas.

$$R\$ 154,13 \times 5 \times 47 = R\$ 36.220,55 \quad (23)$$

Isso gera um gasto a mais de R\$ 36.220,55 no ano.

## 6.8 SÍNTESE DA ANÁLISE

A partir das análises comparativas entre o cenário parâmetro e os demais cenários, foi possível verificar quais são as melhores ações a serem tomadas na linha, de acordo com as diferentes situações que possam vir a acontecer.

A partir da Tabela 20, abaixo, podem ser identificadas as diferenças verificadas entre os cenários simulados para se fazer uma comparação entre elas, a fim de selecionar o cenário para cada situação específica.

Tabela 20 - Diferenças entre os cenários

<b>Cenário</b>	<b>Energia total</b>	<b>Energia Operacional</b>	<b>Energia por peça</b>	<b>Peças produzidas</b>	<b>Diferença monetária diária</b>	<b>Diferença monetária anual</b>
<b>Cenário parâmetro</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/peça	1608	-	-
<b>Cenário 2</b>	-343,92 kWh	+276,38 kWh	-0,5 kWh/peça	+24	-R\$ 221,98	- R\$ 52.165,30
<b>Cenário 3</b>	+384,28 kWh	-125,44 kWh	-0,06 kWh/peça	+24	+R\$ 248,03	+ R\$ 58.287,05
<b>Cenário 4</b>	-1548,98 kWh	+141,11 kWh	+3,11 kWh/peça	-288	-R\$ 999,76	- R\$ 234.943,60
<b>Cenário 5</b>	-5271,76 kWh	-443,68 kWh	-3,52 kWh/peça	+24	-R\$ 3.402,55	- R\$ 799.599,25
<b>Cenário 6</b>	-699,02 kWh	-699,31 kWh	+0,46 kWh/peça	-72	-R\$ 451,17	- R\$ 106.024,95
<b>Cenário 7</b>	-1645,19 kWh	-697,79 kWh	+5,81 kWh/peça	-432	-R\$ 1061,85	- R\$ 249.535,75
<b>Cenário 8</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Cenário 9</b>	+238,80 kWh	+265,60 kWh	+0,45 kWh/peça	-24	+R\$ 154,13	+ R\$ 36.220,55

Fonte: a autora, 2017.

### 6.8.1 Situação 1 – A demanda pela peça A é maior

No caso da demanda pela peça A ser maior, a melhor escolha é pelo cenário 5 (subcapítulo 5.1.5), pois, nesse caso, além de circular somente este tipo de peça na

linha, o circuito que só circula a peça B encontra-se desligado, gerando uma boa economia de energia.

#### **6.8.2 Situação 2 – A demanda pela peça B é maior**

Nesse caso, ainda é melhor manter a linha realizando um *mix* de produção, ao invés de produzir exclusivamente a peça B. Realizando-se um *mix* com mais peças B do que peças A, ocorre um balanceamento da energia.

#### **6.8.3 Situação 3 – A demanda da linha é menor**

No caso de existir uma demanda menor na linha, foram feitas as análises nos cenários 4, 6 e 7. Cada um deles com diferentes graus de impacto na produção, e proporcionalmente, no gasto energético. Cabe ao planejador da produção verificar o quanto é a demanda a fim de escolher entre as configurações de desligamento de máquina.

#### **6.8.4 Situação 4 – A demanda da linha é maior**

O cenário verificado para o caso da demanda ser maior foi o cenário 9, porém, como se pode perceber, o aumento do número de máquinas não incorreu em um aumento de produção. Por conseguinte, caso ocorra uma demanda de aumento inesperado de produção, a empresa deve verificar outras alternativas, como abrir um turno extra, ou rodar a linha no final de semana.

## 7 CONCLUSÃO

A pesquisa permitiu verificar que é possível utilizar a simulação como recurso auxiliar na gestão de energia de uma linha de produção, assim como trazer resultados financeiros de possíveis mudanças na linha, auxiliando processos de decisão dentro da empresa.

Para chegar a este resultado, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica em diversas fontes, buscando-se, primeiramente, os modelos que foram propostos na literatura sobre melhoria da eficiência energética em linhas de produção.

Percebeu-se que o uso de simulação como recurso para a gestão da energia não é um recurso ainda muito utilizado e, por isso, foi estabelecido como o tema da pesquisa a utilização de simulação como ferramenta para gerenciar o uso energético de uma linha.

Em seguida, foi proposto um modelo de aplicação da gestão de energia na linha de produção, utilizando-se a simulação, com o diferencial de que este modelo propunha-se a auxiliar a implementação dessa gestão em linhas futuras, ou seja, linhas de produção ainda em fase de planejamento.

Na linha onde o modelo foi aplicado, pretende-se efetuar uma mudança para que um novo produto possa começar a circular. Para isso, será necessário que novas máquinas sejam adicionadas na linha, além de ser necessária uma mudança de fluxo em algumas partes dessa linha.

Para estudar essas mudanças, foi realizada uma simulação da linha como ela opera atualmente, refinando-a até o ponto que ela espelhasse a linha real, da forma mais precisa possível. Assim que este objetivo foi atingido, foi possível gradualmente alterá-la para então criar a simulação da linha no futuro.

Quando a simulação da linha futura refletiu o fluxo funcionando corretamente, foi possível estudar o consumo energético da mesma e, em seguida, gerar cenários possíveis de serem implementados na linha. Isso permitirá que planos de ação para gerenciar a energia já sejam planejados de antemão.

Por fim, foi possível verificar que o uso de simulação para atender a gestão de energia de uma linha, mesmo que ela ainda não tenha sido implementada, é um recurso válido.

## 7.1 RESGATE DOS OBJETIVOS

Reverendo o que foi proposto durante a pesquisa, faz-se aqui um resgate dos objetivos propostos, a fim de saber se estes foram cumpridos e se a pergunta de pesquisa foi respondida.

O objetivo estabelecido nessa dissertação foi propor um novo modelo que utiliza simulação discreta para avaliar o consumo de energia em uma nova linha de usinagem de produtos.

Baseando-se neste objetivo, foram elencados alguns objetivos específicos a fim de atingir o objetivo principal, sendo eles:

- a) identificar na literatura os *frameworks* utilizados em eficiência energética;
- b) propor um modelo que tenha como ferramenta um software de simulação, e que permita avaliar o uso de energia numa linha de produção;
- c) realizar testes com o apoio de simulação do modelo proposto;
- d) analisar os dados de gastos energéticos gerados pela simulação para gerar relatório final.

Com a finalidade de atingir o primeiro objetivo, foi realizado um trabalho de revisão sistemática de literatura, além de uma revisão da literatura clássica, na qual foram encontrados diversos trabalhos sobre o tema “eficiência energética”. O produto desse objetivo foi um artigo que pode ser visto no Apêndice B.

Em segundo lugar, visando atingir o objetivo b, foi proposto um modelo que permitiu analisar uma linha operando em situação real e verificar como realizar mudanças para que ela se adeque ao projeto de uma linha futura. Além disso, uma vez estabelecido o modelo da linha futura, foram realizados testes para viabilizar a gestão de energia dessa linha nova, objetivando prever cenários de antemão e criar planos de ação para gerenciar a energia dessa nova linha.

Em seguida, após a proposição do modelo, foi realizada a aplicação deste em uma situação real, com a construção da linha atual e da linha futura, a verificação da sua fidelidade à linha real e, por fim, a elaboração de diversos cenários para a realização dos experimentos de cunho energético a fim de verificar os impactos gerados a cada mudança proposta, conforme a demanda do terceiro objetivo.

Por fim, para atingir o último objetivo, após serem realizados os testes dos diferentes cenários propostos, efetuou-se a comparação entre os gastos energéticos e o cenário parâmetro, para verificar as diferenças. Por fim, foi analisado qual seria o melhor cenário para as diferentes situações reais que a linha de produção pode enfrentar.

Pode-se dizer então que os objetivos estabelecidos no começo do trabalho foram atingidos.

Além disso, o trabalho possuía como questão problema a pergunta: “Como o uso de simulação discreta pode ajudar na gestão do consumo de energia em uma linha nova de produção?”.

A resposta para a questão-problema apresentada no trabalho é que, neste caso, isso foi possível. Foi criada uma simulação suficientemente fiel capaz de gerir o consumo desta linha, tornando possível a criação de cenários que refletem como será o comportamento energético da linha e, conseqüentemente, possibilitando a elaboração de planos de ação, caso isso seja necessário.

## 7.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Os temas eficiência energética e gestão da energia são cada vez mais visados pelos pesquisadores, levando-se em conta seu viés ligado à sustentabilidade e a necessidade de utilizar os recursos de forma cada vez mais eficiente. Ademais, impera uma crise energética e esses recursos encontram-se cada vez mais escassos.

Por conseguinte, buscar formas para gerir a energia é um assunto da mais alta relevância.

Este trabalho trouxe uma proposta de modelo que permite gerenciar os gastos energéticos de uma linha nova de produção, utilizando-se um software de simulação que permite a leitura de dados energéticos. Por meio dos resultados coletados por essas simulações, foi possível prever o comportamento da linha em relação aos gastos com energia.

## 7.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Algumas das limitações do trabalho são que os cenários simulados pela autora foram os que não envolviam programações que teriam que ser realizadas pela equipe de engenharia de processos da linha como, por exemplo, alteração de tempo de ciclo

das máquinas, de MTBF e MTTR, entre outras. A autora limitou-se a realizar alterações que não mudavam essas configurações.

Além disso, o software que possibilitava a mensuração de energia, o *Plant Simulation*, não possuía algumas das funções que poderiam ter propiciado que o estudo ficasse mais aprofundado como, por exemplo, a alteração do tamanho do lote. Essa medição poderia ter gerado novos resultados interessantes para a pesquisa. Outra função que falta no *Plant Simulation* é a simulação a longo prazo. Por ser um programa muito pesado, ele não gera simulações de longos períodos de tempo, como o Witness faz.

Outra limitação do trabalho foi o fato da simulação ter sido realizada em somente uma linha de produção, em uma única empresa. A realização do estudo em outra linha poderia gerar mais resultados, os quais permitiriam estabelecer comparações.

Por fim, esse trabalho foi aplicado em uma linha que ainda não está em operação. Apesar dos dados utilizados nas máquinas atuais serem fiéis à realidade, as máquinas novas que serão implantadas na linha utilizam os dados obtidos do fornecedor. Isso pode gerar alguma variação quando a linha for instalada e as coletas de dados, posteriormente, podem apontar alguns erros nos parâmetros utilizados nesse estudo.

#### 7.4 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme foi citado anteriormente, este estudo foi feito exclusivamente em uma empresa, refletindo um caso único. Conseqüentemente, sugere-se aqui uma expansão dessa pesquisa, por meio da replicação desse estudo em outros tipos de empresa, com outros tipos de produto, para verificar a sua aplicabilidade em outros cenários.

Além disso, foi percebido durante o trabalho, que as máquinas lavadoras, por estar sempre ligadas trabalhando, geram um consumo muito grande de energia. Um estudo de como diminuir o consumo nessas máquinas seria muito interessante.

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, E.A., SAIDUR, R., MEKHILEF, S.. A review on energy saving strategies in industrial sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.5, p.150–168. 2011
- ABDULMALEK, Fawaz A., RAJGOPAL, Jayant. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of Production Economics**. v.107, p.223–236. 2007.
- ABELE, Eberhard., BRAUN, Steffen, SCHRAML, Philipp. Holistic simulation environment for energy consumption prediction of machine tools. **Procedia CIRP**. v.29, p.251-256. 2015.
- ALDURGHAM, M.M., BARGHASH M.A. A generalised framework for simulation-based decision support for manufacturing. **Production Planning and Control**. v.19, n.5, p.518-534. 2008.
- BALCI, O. Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study *Annals of Operations Research* v. 53, n.1, p.121–173. 1994. apud ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**. v.59, p.278–290. 2007.
- BALL, P.D., EVANS, S., LEVERS, A. and ELLISON, D. Zero carbon manufacturing facility – towards integrating material, energy and waste process flows. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**. v.223, n.B9, p.1085-1096. 2009
- BALL, Peter. Low energy production impact on lean flow. **Journal of Manufacturing Technology Management**. v. 26, n.3, p.412–428. 2015
- BANKS, Jerry. Discrete event simulation. **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**. Marietta, Georgia. pp. 7-13. 1999.
- BATEMAN, Robert E. **Simulação de sistemas**: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013 161 p.
- BLEYL, Jan W., EIKMEIER, Bernd, SEEFELDT, Friedrich Energy Contracting: How much can it Contribute to Energy Efficiency in the Residential Sector? Transaction and Life Cycle Cost Analyses. **Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably**. p.985-996. 2009
- BLOMQVIST, E., THOLLANDER, P. An integrated dataset of energy efficiency measures published as linked open data. **Energy Efficiency** v.8, n.6, p.1125-1147. 2015.
- BUNSE, Katharina, VODICKA, Matthias, SCHÖNSLEBEN, Paul, BRÜLHART, Marc, ERNST, Frank O.. Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.667-679. 2011

CARVALHO, Hugo Marcelo Bezerra de. **Metodologia de Avaliação e Aumento da Eficiência Energética em Manufatura de Elementos Discretos: Aplicação em Usinagem**, Tese de Doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2015.

CATALDO, A., SCATTOLINI, R., TOLIO, T. An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.11, p.53–61. 2015.

ÇENGEL, Y. A. Energy efficiency as an inexhaustible energy resource with perspectives from the U.S. and Turkey. **International Journal of Energy Research** v.35, n.2, p.153-161. 2011.

CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino. **Metodologia científica: para uso dos estudantes universitários**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. 249 p.

CHRISTOFFERSEN, Line B., LARSEN, Anders, TOGEBY, Mikael. Empirical analysis of energy management in Danish industry. **Journal of Cleaner Production**, v.14, p.516-526. 2006.

CONNOLLY, T. M., STANSFIELD, M. From e-learning to games-based e-learning: Using interactive technologies in teaching an IS course. **International Journal of Information Technology and Management**, v.6, n.2-4, p.188-208. 2007.

COPEL. **Tarifa Convencional - subgrupo B3**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F8c04fbf11f00cc5703257488005939be>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

DECANIO, S. Barriers within firms to energy-efficient investments. **Energy Policy**. v.21, n. 9, p.906-914. 1993.

DINCER, I. On energy conservation policies and implementation practices. **International Journal of Energy Research**. v.27, n.7, p.687-702. 2003.

DUFLOU, Joost R.; SUTHERLAND, John W.; DORNFELD, David; HERRMANN, Christoph; JESWIET, Jack; KARA, Sami; HAUSCHILD, Michael; KELLENS, Karel. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP Annals**, v.6, n.2, p.587-609. 2012

EICHHAMMER, Wolfgang, MANNSBART, Wilhelm. Industrial energy efficiency - Indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry. **Energy Policy**, v.25, n. 7-9, p.759-772. 1997.

ENRICO, C., TRIANNI, A. Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: an exploratory study in small and medium-sized enterprises. **Journal of Cleaner Production**, v.82, n.1, p.70–83. 2014

FORSSÉN-NYBERG, Minna, HAKAMÄKI, Jussi. Development of the production using participative simulation games: Two case studies. **International Journal Production Economics**. v.56-57, p.169-178. 1998.

FYSIKOPOULOS, A., PASTRAS, G., ALEXOPOULOS, T., CHRYSOLOURIS, G. On a generalized approach to manufacturing energy efficiency. **The International**

**Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.73, n.9-12, p.1437-1452. 2014.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

GOMES, Victor Emmanuel de Oliveira. **Método para o aumento de eficiência energética em sistemas de manufatura discreta em nível e produção**. 160f. Tese de doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2015.

GOPALAKRISHNAN, B., RAMAMOORTHY, K., CROWE, E., CHAUDHARI, S., LATIF, H. A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. v.7, p.154-165. 2014.

GORDIC, Dušan, BABIC, Milun, JOVICIC, Nebojša, ŠUŠTERŠIĆ, Vanja, KONCALOVIC, Davor, JELIC, Dubravka. Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. **Energy Conversion and Management**. v.51, p.2783–2790. 2010.

HASANBEIGI, A., MENKE, C., DU PONT, P. Barriers to energy efficiency improvement and decision-making behavior in Thai industry. **Energy Efficiency**. v.3, n.1, p.33-52. 2010

HERRMANN, Christoph, THIEDE, Sebastian. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology** v.1, p.221–229. 2009

HIRST, E., BROWN, M.A.. Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. **Resources, Conservation and Recycling**, v.3, n.4, p.267-281. 1990.

IPCC. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment **Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers**. Acesso em 30 de abril de 2016, de [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_spm.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf). 2007

ISO 50001:2011 Energy Management Systems Standard e Requirements with Guidance for Use. **International Organization for Standardization (ISO)**. 2011.

JAFFE, Adam B., STAVINS, Robert N.. The energy-efficiency gap – What does it mean?. **Energy Policy**, v.22, n.10, p.804-810. 1994.

JANNUZZI, Gilberto De Martino. Power sector reforms in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities. **Energy Policy**, v.33, p.1753-1762. 2005.

KANNAN, R., BOIE, W.. Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. **Energy Conversion and Management**, v.44, p.945–959. 2003.

KOUKI, Meriem, CARDIN, Olivier, CASTAGNA, Pierre, CORNARDEAU, Celine. Input data management for energy related discrete event simulation modelling. **Journal of Cleaner Production**. v.141, p.194-207. 2017.

- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 4. ed., rev. e ampl. São Paulo: Atlas, 2001. 288 p.
- LAREK, R., BRINKSMEIER, E., MEYER, D., PAWLETTA, T., HAGENDORF, O. A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. **Production Engineering**. v.5, n.5, p.575-579. 2011.
- MARTIN, N., WORRELL, E., SCHIPPER, L. and BLOK, K. International Comparisons of Energy Efficiency, workshop proc., Berkeley, CA, Utrecht University, March. 1994. apud PHYLIPSEN, G. J. M., BLOK, K., WORRELL, E. International comparisons of energy efficiency - Methodologies for the manufacturing industry. **Energy Policy**, v. 25, n.7-9, p. 715-725. 1997.
- MARTÍNEZ, Clara I.P. Energy efficiency developments in the manufacturing industries of Germany and Colombia, 1998–2005. **Energy for Sustainable Development**, v.13, p.189–201. 2011.
- MARTINS, Roberto Antonio. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: Paulo Augusto Cauchick Miguel (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier. ABEPRO, 2012.
- MAY, G., STAHL, B., TAISCH, M., PRABHU, V. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. **International Journal of Production Research**. v.50, n.23, p.7071-7089. 2015.
- MILLS, E., SHAMSHOIAN, G., BLAZEK, M., NAUGHTON, P., SEESE, R. S., TSCHUDI, W., SARTOR, D. The business case for energy management in high-tech industries. **Energy Efficiency** v.1, n.1, p.5-20. 2008.
- MINCHENER, A. J. Technology transfer issues and challenges for improved energy efficiency and environmental performance in China. **International Journal of Energy Research**. v.24, n.11, p.1011-1027. 2000.
- MORABITO NETO, Reinaldo; PUREZA, Vitória. Modelagem e Simulação. In: Paulo Augusto Cauchick Miguel (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier. ABEPRO, 2012.
- MUKHERJEE, Kankana. Energy use efficiency in U.S. manufacturing: A nonparametric analysis. **Energy Economics**, v.30, p.76–96. 2008.
- NAKANO, Davi. Métodos de pesquisa adotados na engenharia de produção e gestão de operações. In: Paulo Augusto Cauchick Miguel (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier. ABEPRO, 2012.
- NGAI, E. W. T., CHAU, D.C.K., POON, J.K.L., TO, C.K.M. Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. **International Journal of Production Economics**. v.146, n.2, p.453-464. 2013.
- OLIVEIRA, Lilian S., SHAYANI, Rafael A., OLIVEIRA, Marco Aurelio G.. Proposed business plan for energy efficiency in Brazil. **Energy Policy**, v.61, p.523-531. 2013
- OSTERTAG, K.. Transaction costs of raising energy efficiency. In **Proceedings of the IEA international workshop on technologies to reduce greenhouse gas**

**emissions: engineering-economic analyses of conserved energy and carbon**, v.5-7. 1999

PATTERSON, Murray G.. What is energy efficiency? - Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v.24, n.5, p.377-390. 1996.

PAZ, Luciana R.L., SILVA, Neilton F., ROSA, Luiz P..The paradigm of sustainability in the Brazilian energy sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.11, p.1558–1570. 2007.

PENG, T., XU, X. Energy-efficient machining systems: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.72, n.9-12, p.1389-1406. 2014.

PHYLIPSEN, G. J. M., BLOK, K., WORRELL, E. International comparisons of energy efficiency - Methodologies for the manufacturing industry. **Energy Policy**, v. 25, n.7-9, p. 715-725. 1997.

PORTAL MINISTÉRIO MINAS E ENERGIA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico-nacional>>. Acesso em: 29 out. 2015.

PORTAL MINISTÉRIO MINAS E ENERGIA. **PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2030**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/plano-nacional-de-energia-2050>>. Acesso em: 29 out. 2015.

ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**. v.59, p.278–290. 2007.

ROHDIN, P., THOLLANDER, P., SOLDING, P. Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. **Energy Policy**. v.35, n.1, p.672-677. 2007.

RYAN, John, HEAVEY, Cathal. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**. v.57, p.437–450. 2006.

SARDIANOU, E.. Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. **Journal of Cleaner Production**, v.16, p.1416-1423. 2008.

SCIMAGO. **ABOUT US**. Disponível em: <<http://www.scimagojr.com/aboutus.php>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4 ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SPRU (Science and Technology Policy Research). **Reducing barriers to energy efficiency in public and private organizations**. Brighton, UK: SPRU. 2000.

TANAKA, Kanako. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. **Energy Policy**, v.36, p.2887-2902. 2008.

TANAKA, Kanako. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. **Energy Policy**. v.39, p.6532-6550. 2011.

THIEDE, S., SEOW, Y., ANDERSSON, J., JOHANSSON, B., Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation: State of the art and research perspectives. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.6, n.1, p.78-87. 2013.

THOLLANDER, Patrik, DOTZAUER, Erik. An energy efficiency program for Swedish industrial small- and medium-sized enterprises. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.1339-1346. 2010.

THOLLANDER, Patrik, OTTOSSON, Mikael. Energy management practices in Swedish energy-intensive industries. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.1125-1133. 2010.

TRANFIELD, D., DENYER, D., SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**. v.14, p.207-222. 2003.

TRIANNI, A., CAGNO, E., DE DONATIS, A. A framework to characterize energy efficiency measures. **Applied Energy**. v.118, p.207-220. 2014.

ULUER, Muhtar U., UNVER, Hakki O., GOK, Gozde, FESCIOGLU-UNVER, Nilgun, KILIC, Sadik E.. A framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry. **Journal of Cleaner Production**, v.X, p.1-19. 2015.

VIKHOREV, Konstantin, GREENOUGH, Richard, BROWN, Neil. An advanced energy management framework to promote energy awareness. **Journal of Cleaner Production**, v.43, p.103-112. 2013.

WEINERT, N., CHIOTELLIS, S., SELIGER, G., Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v.60, n.1, p.41-44. 2011.

WORRELL, E., BERNSTEIN, L., ROY, J., PRICE, L., HARNISCH, J., Industrial energy efficiency and climate change mitigation. **Energy Efficiency**, v.2, p.109-123. 2009

WORRELL, E., L. Price. Policy scenarios for energy efficiency improvement in industry. **Energy Policy**. v.29, n.14 p.1223-1241.2001.

WORRELL, E., LAITNER, John A., RUTH, Michael, FINMAN, Hodayah. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. **Energy**, v.28, p.1081-1098. 2003

YINGJIE, Z. Energy efficiency techniques in machining process: a review. The **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.71, n.5-8, p.1123-1132. 2014

## APÊNDICE A – REFERÊNCIAS CITADAS NA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

AFLAKI, S., KLEINDORFER, P. R., POLVORINOS, V. S. M. Finding and Implementing Energy Efficiency Projects in Industrial Facilities. **Production and Operations Management**. v.22, n.3, p.503-517. 2013.

AGUIRRE, F., VILLALOBOS, J. R., PHELAN, P. E., PACHECO, R. Assessing the relative efficiency of energy use among similar manufacturing industries. **International Journal of Energy Research**. v.35, n.6, p.477-488. 2011.

ARDEHALI, M. M., SMITH, T. F. Development of framework for realization and classification of static and dynamic energy efficiency measures. **Energy Conversion and Management**. v.48, n.10, p.2630-2637. 2007.

ARIGLIANO, A., CARICATO, P., GRIECO, A., GUERRIERO, E. Producing, storing, using and selling renewable energy: The best mix for the small medium industry. **Computers in Industry**. v.65, n.3, p.408-418. 2014.

BASHMAKOV, I., A. MYSHAK. Russian energy efficiency accounting system. **Energy Efficiency**. v.7, n.5, p.743-759. 2014.

BONVOISIN, J, THIEDE, S., BRISSAUD, D., HERRMANN, C. An implemented framework to estimate manufacturing-related energy consumption in product design. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. v.26, n.9, p.866-880. 2013.

CHAI, K. H., BAUDELAIRE, C. Understanding the energy efficiency gap in Singapore: a Motivation, Opportunity, and Ability perspective. **Journal of Cleaner Production**. v.100, p.224-234. 2015.

CHUI, S., GOLDSMITH, A.J. Cross-layer design of energy-constrained networks using cooperative MIMO techniques. **Signal Processing**. v.86, n.8, p.1804-1814. 2006.

DEMIRBAS, A. Energy Issues and Energy Priorities. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**. v.3, n.1, p.41-49. 2007.

DIAZ, N., HELU, M., JAYANATHAN, S., CHEN, Y., HORVATH, A., DORNFELD, D., Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments. **International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)**, May 17-19, 2010, Arlington, Virginia, United States. p.1–6. 2010.

FLEITER, T., GRUBER, E., EICHHAMMER, W., WORRELL, E. The German energy audit program for firms—a cost-effective way to improve energy efficiency?. **Energy Efficiency**. v.5, n.4, p.447-469. 2012.

FRIGERIO, N., MATTA, A. Analysis on Energy Efficient Switching of Machine Tool With Stochastic Arrivals and Buffer Information. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. v.13, n.1, p.238–246. 2016.

- FRIGERIO, N., MATTA, A. Energy-efficient control strategies for machine tools with stochastic arrivals. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. v.12, n.1, p.50-61. 2015.
- GAHM, C., DENZ, F., DIRR, M., TUMA, A. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. **European Journal of Operational Research**. v.248, n.3, p.744-757. 2016.
- HASANBEIGI, A., MENKE, C., THERDYOTHIN, A. Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. **Energy Efficiency**. v.4, n.1, p.93-113. 2011.
- HERTEL, M., MENRAD, K. Adoption of energy-efficient technologies in German SMEs of the horticultural sector—the moderating role of personal and social factors. **Energy Efficiency**. v.9, n.3, p.791-806. 2016.
- HONMA, S., HU, J. L. Total-factor energy efficiency for sectors in Japan. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy**. v.8, n.2, p.130-136. 2013.
- HU, J. L., LIO, M.C., KAO, C.H., LIN, Y.L. Total-factor Energy Efficiency for Regions in Taiwan. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**. v.7, n.3, p.292-300. 2012.
- JEON, H. W., TAISCH, M., PRABHU, V.V. Modelling and analysis of energy footprint of manufacturing systems. **International Journal of Production Research**. v.53, n.23, p.7049-7059. 2014.
- JIA, S., TANG, R., LV, J. Machining activity extraction and energy attributes inheritance method to support intelligent energy estimation of machining process. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v.27, n.3, p.595-616. 2016.
- JIA, S., TANG, R., LV, J. Therblig-based energy demand modeling methodology of machining process to support intelligent manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v.25, n.5, p.913-931. 2014.
- JOHANSSON, M. Improved energy efficiency within the Swedish steel industry—the importance of energy management and networking. **Energy Efficiency**. v.8, n.4, p.713-744. 2015.
- KESICKI, F.; YANAGISAWA, A. Modelling the potential for industrial energy efficiency in IEA's World Energy Outlook. **Energy Efficiency** v.8, n.1, p.155-169. 2015.
- LEE, A. D., ONISKO, S. A. Economics and utility energy- efficiency programmes housing. **Utilities Policy**. v.4, n.2, p.133-139. 1994.
- LEE, S., PRABHU, V. Energy-aware feedback control for production scheduling and capacity control. **International Journal of Production Research**. p.1-13. 2015.
- LI, Y., HE, Y., WANG, Y., YAN, P., LIU, X. A framework for characterizing energy consumption of machining manufacturing systems. **International Journal of Production Research**. v.52, n.2, p.314-325. 2014.

- LIU, H., ZHAO, Q., HUANG, N., ZHAO, X. 2013. A simulation-based tool for energy efficient building design for a class of manufacturing plants. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. v.10, n.1, p.117-123.
- LIU, Y. Seasonal relationship of peak demand and energy impacts of energy efficiency measures—a review of evidence in the electric energy efficiency programmes. **Energy Efficiency**: 1-21. doi:10.1007/s12053-015-9407-6. 2015.
- MIAH, J. H., GRIFFITHS, A., MCNEILL R., POONAJI I., MARTIN R., LEISER A., MORSE S., YANG A., SADHUKHAN J. Maximising the recovery of low grade heat: An integrated heat integration framework incorporating heat pump intervention for simple and complex factories. **Applied Energy**. v.160, p.172-184. 2015.
- MOURA, P.S., LÓPEZ, G. L., MORENO, J. I., DE ALMEIDA, A. T. The role of Smart Grids to foster energy efficiency. **Energy Efficiency**. v.6, n.4, p.621-639. 2013.
- NEELIS, M., RAMIREZ-RAMIREZ, A., PATEL, M., FARLA, J., BOONEKAMP, P., BLOK, K. Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980-2003. **Energy Policy**. v.35, n.12, p.6112-6131. 2007.
- NEWMAN, S. T., NASSEHI, A., IMANI-ASRAI, R., DHOKIA, V. Energy efficient process planning for CNC machining. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.5, n.2, p.127-136. 2012.
- NGAI, E. W. T., TO, C.K.M., CHING, V.S.M., CHAN, L.K., LEE, M.C.M., CHOI, Y.S., CHAI, P.Y.F. Development of the conceptual model of energy and utility management in textile processing: A soft systems approach. **International Journal of Production Economics**. v.135, n.2, p.607-617. 2012.
- NIKNAM, Taher, GOLESTANEH, Faranak, MALEKPOUR, Ahmadreza. Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm. **Energy**. v.43, n.1, p.427-437. 2012.
- O'DRISCOLL, E., CUSACK, D. O., O'DONNELL, G. E. The development of energy performance indicators within a complex manufacturing facility. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.68, n.9-12, p.2205-2214. 2013.
- ÖZKARA, Y., ATAK, M. Regional total-factor energy efficiency and electricity saving potential of manufacturing industry in Turkey. **Energy**. v.93, p.495-510. 2015.
- PERRELS, A. Market imperfections and economic efficiency of white certificate systems. **Energy Efficiency**. v.1, n.4, p.349-371. 2008.
- RAILEANU, S., ANTON, F., IATAN, A., BORANGIU, T., ANTON, S., MORARIU, O. Resource scheduling based on energy consumption for sustainable manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**: Available Online. 2015. Doi:10.1007/s10845-015-1142-5
- ROGAN, F., CAHILL, C.J., DALY, H.E., DINEEN, D., DEANE, J. P., HEAPS, C., WELSCH, M., HOWELLS, M., BAZILIAN, M., GALLACHÓIR, B.P.Ó. LEAPs and Bounds—an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. **Energy Efficiency**. v.7, n.3, p.441-466. 2014.

- SALIDO, M., ESCAMILLA, J., GIRET, A., BARBER, F. A genetic algorithm for energy-efficiency in job-shop scheduling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.85, n.5, p.1303-1314. 2016.
- SALTA, M., POLATIDIS, H., HARALAMBOPOULOS, D. 2009. Energy use in the Greek manufacturing sector: A methodological framework based on physical indicators with aggregation and decomposition analysis. **Energy**. v.34, n.1, p.90-111.
- SCHALL, D., HIRZEL, S. Thermal cooling using low-temperature waste heat: a cost-effective way for industrial companies to improve energy efficiency?. **Energy Efficiency**. v.5, n.4, p.547-569. 2012.
- SEOW, Y., RAHIMIFARD, S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.4, n.3, p.258-264. 2011.
- SHROUF, F., MIRAGLIOTTA, G. Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management. **Journal of Cleaner Production**. v.100, p.235-246. 2015.
- SHUI, H., JIN, X., NI, J. Manufacturing productivity and energy efficiency: a stochastic efficiency frontier analysis. **International Journal of Energy Research**. v.39, n.12, p.1649-1663. 2015.
- SIVILL, L., MANNINEN, J., HIPPINEN, I., AHTILA, P. Success factors of energy management in energy-intensive industries: Development priority of energy performance measurement. **International Journal of Energy Research**. v.37, n.8, p.936-951. 2013.
- SOYTAS, U., SARI, R. The relationship between energy and production: Evidence from Turkish manufacturing industry. **Energy Economics**. v.29, n.6, p.1151-1165. 2007.
- STENQVIST, C., NILSSON, L. Energy efficiency in energy-intensive industries—an evaluation of the Swedish voluntary agreement PFE. **Energy Efficiency**. v.5, n.2, p.225-241. 2012.
- SUNDBERG, J., WENE, C. O. Integrated modelling of material flows and energy systems (MIMES). **International Journal of Energy Research**. v.18, n.3, p.359-381. 1994.
- TESKE, S., PREGGER, T., SIMON, S., NAEGLER, T., GRAUS W., LINS, C. Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. **Energy Efficiency** v.4, n.3, p.409-433. 2011.
- THOLLANDER, Patrik, OTTOSSON, Mikael. 2008. An energy efficient Swedish pulp and paper industry – exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. **Energy Efficiency**. v.1, n.1, p.21-34. 2008
- TRISTO, G., BISSACCO, G., LEBAR, A., VALENTINČIČ, J. Real time power consumption monitoring for energy efficiency analysis in micro EDM milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.78, n.9-12, p.1511-1521. 2015.

- VIKLUND, S.B. 2015. Energy efficiency through industrial excess heat recovery—policy impacts. **Energy Efficiency**. v.8, n.1, p.19-35. 2015.
- WANG, X., LUO, W., ZHANG, H., DAN, B., LI, F. Energy consumption model and its simulation for manufacturing and remanufacturing systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. p.1-13. 2015.
- WANG, Z.-H., ZENG, H-L., WEI, Y-M., ZHANG, Y-X. Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China. **Applied Energy**. v.97, p.115-123. 2012.
- YANG, L., DEUSE, J., JIANG, P. Multi-objective optimization of facility planning for energy intensive companies. **Journal of Intelligent Manufacturing**. v.24, n.6, p.1095-1109. 2013
- YANG, L., DEUSE, J., JIANG, P. Multiple-attribute decision-making approach for an energy-efficient facility layout design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.66, n.5-8, p.795-807. 2013
- ZAMPOU, E., PLITSOS, S., KARAGIANNAKI, A., MOURTOS, I. Towards a framework for energy-aware information systems in manufacturing. **Computers in Industry**. v.65, n.3, p.419-433. 2014.
- ZHANG, R., CHIONG, R. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: a multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. **Journal of Cleaner Production**. v.112, n.4, p.3361-3375. 2016.
- ZHANG, Y., GE, L. Method for process planning optimization with energy efficiency consideration. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.77, n.9-12, p.2197-2207. 2015.
- ZHONG, Q., ZHONG, Q., TANG, R., LV, J., JIA, S., JIN, M. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.82, n.9, p.2087-2089. 2016.

## APÊNDICE B – ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - POMS

### Modelos de eficiência energética: uma visão geral da literatura

#### Energy efficiency frameworks: a literature overview

Giulia Cavichiolo Saldanha<sup>1</sup>; Sergio Eduardo Gouvea da Costa<sup>2,3</sup>; Edson Pinheiro de Lima<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil;

<sup>2</sup>Professor da Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil

<sup>3</sup>Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, km 1, Pato Branco – 85503-390, Brasil

#### Resumo

A indústria de manufatura depende da energia, um recurso cada vez mais escasso. Tendo isso em conta, as empresas procuram utilizar este recurso de forma mais eficiente. Este artigo objetiva uma revisão sistemática da literatura sobre os modelos utilizados para a implementação da eficiência energética, como um estudo preliminar do campo.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Revisão Sistemática da Literatura, Estruturas

#### Abstract

The manufacturing industry depends on energy, an increasingly scarce resource. Taking this into account, companies seek to use this resource efficiently. This article aims at a systematic literature review on frameworks used for the implementation of energy efficiency as a preliminary study of the field.

**Keywords:** Energy Efficiency, Systematic Literature Review, Frameworks

## 1 INTRODUCTION

The problem of energy scarcity hits global scale. This is due to the fact that much of the energy production depends on non-renewable sources. As in supply and demand law, the lower is the amount of energy provided, the more expensive it becomes, causing a major problem for industry in general, which is dependent on it. It is therefore important that these industries become more energy efficient in the interests of competitiveness and the global environment. (Vikhorev et al. 2013).

Costs on electricity to an industry like the automotive represent a large part of the company expenses. For this reason, looking for ways to reduce spending is vital to its economic sustainability.

Considering this, there are areas of study such as energy efficiency, seeking ways to optimize the use of energy within the environment it is being used. Several authors study this area and look for different ways to propose application models. Çengel (2011) states that "Energy efficiency is to reduce energy use to the minimum level, but to do so without reducing the standard of living, the production quality, and the profitability."

According to Patterson (1996), energy efficiency is a generic term and there is not a quantitative measure of "energy efficiency" that is not equivocal. On the contrary, one should rely on a number of indicators to measure changes in energy efficiency. In general, energy efficiency refers to the use of less energy to produce the same amount of services or useful output. For example, in the industrial sector, energy efficiency can be measured by the amount of energy needed to produce a ton of product.

Power management is an effective way to monitor energy expenditure, maximize profits and improve competitive positions through organizational measures and optimization of energy efficiency. Furthermore, it is a dynamic process that generates new knowledge, promoting efficiency gains. (Kannan and Boie, 2003)

Studies claim that there are a number of barriers that inhibit the adoption of cost-effective energy efficiency measures (Sardianou, 2008). Although there is a need for industrial energy efficiency, studies indicate that the measurements for efficient energy conservation in relation to costs are not always implemented, which indicates the existence of an energy efficiency gap. This gap is explained by the existence of barriers to energy efficiency (Hirst and Brown, 1990).

An industrial energy program aims to reduce barriers that prevent energy efficiency. For this reason, it is extremely important to detect obstacles that restrict markets for energy efficient technologies in order to effectively reduce these barriers (Thollander and Dotzauer, 2010).

Several researchers propose frameworks on how energy efficiency must be implemented in industry, and how to make these applications easier. Considering this, the present study seeks to compile several models on energy efficiency that were applied in different industrial areas that were found through a systematic literature review.

The article is organized as follows. First, the methodology applied in the article is described. Then, the models and frameworks found in the literature are explained. Finally, the conclusions and contributions of the paper are presented.

## **2 METHODOLOGY**

In order to find frameworks proposed by researchers in energy efficiency, the methodology used by the authors is a systematic literature review. The method is based on the steps proposed in the 2003-article from Tranfield et al.. The stages consist in identifying the subject that needs to be researched, preparing the proposal of this research and then formulating a protocol that is going to show the search terms and which databases are to be used, what are the exclusion criteria, the types of publications, and the time window of the research.

After defining the protocol, the research is done by using the search terms in the databases and in the articles resulting from the search. Afterwards the authors select which ones are chosen according to the criteria predefined in the protocol. During this phase/process, the exclusion occurs while reading the abstracts. After this filtering process, the selected items are read in full, and the answers of the research questions are sought. (Tranfield et al. 2003).

In this article the methodology was applied in order to search what are the different types of frameworks that researchers have proposed to implement energy efficiency in manufacturing, also seeking what are the models applied in the automotive industry. This focus is due to the fact this study is the preliminary part of a larger research, in which a model is going to be proposed for the implementation of energy efficiency on a machining line of an automotive industry.

As exclusion criterion, it was defined that duplicate items would be eliminated, articles that had nothing to do with energy efficiency and energy management, as well as articles regarding energy efficiency in homes. Finally, the last exclusion criteria was whether the article belonged to a journal rated below the Q1 category in Scimago in order to restrict the research to the most relevant articles. The defined protocol is shown in Table 1.

When the search terms were applied in the databases, the search results returned over 500 articles, which after being refined using the exclusion criteria, totaled 78 articles selected for analysis presented in the next section.

Table 1 – Research Protocol

<b>Search Terms (ABS, TITLE OR KEYWORDS)</b>	Group 1: ("Energy and utility management*" OR "Energy efficiency" OR "Energy management" OR "Energy saving measures" OR "Industry energy efficiency" OR "energy measur*" OR "Energy-saving factors");
	Group 2: ("Conceptual model" OR "Maturity models" OR "Process mapping" OR "framework");
	Group 3: ("Manufacturing" OR "Manufacturing industry" OR "Car industry" OR "Automotive industry" );
<b>Search Strategy</b>	AND between groups;
<b>Databases</b>	Science Direct, Wiley and Sons, Taylor and Francis, Springer, Scopus;
<b>Exclusion criteria</b>	Eliminate duplicate articles;
	Eliminate the article if does not refer to Group 1;
	Eliminate the article if refers to energy efficiency at houses;
	Eliminate the article if the Journal ranking in Scimago is below Q1 in Energy and Industrial and Manufacturing Engineering categories;
<b>Language</b>	English;
<b>Publication Type</b>	Articles of international journals with com peer review;
<b>Time Window</b>	Not specified.

### 3 FRAMEWORKS IN LITERATURE

To achieve energy efficiency, most of the times managers must follow steps to implement an energy efficiency program. Although there are barriers that prevent these programs from being deployed successfully. In his research, Minchener (2000) states that to implement energy efficiency with success in a country like China, it is necessary to mitigate the barriers with actions such as introduction of more effective procedures for developing and supporting energy efficiency improvements. The main problems related to the environment and the difficulties related to the implementation of energy conservation programs are listed in Dincer (2003) article which also proposes key steps to implement them successfully. Chai and Baudelaire (2015) try to understand the energy efficiency barriers in Singapore, using a theoretical framework based on the Motivation, Opportunity, and Ability (MOA) theory.

Trianni et al. (2014) provide a structured basis of the drivers that promote industrial energy efficiency, as well as knowledge on energy efficiency measures and comprehension of the barriers blocking their adoption.

Thollander and Ottosson (2008) study the barriers that exist and prevent energy efficiency from happening. It is showed that a lot of times, these barriers are a consequence of how the energy issue is organized within the companies. Hasanbeigi et al. (2010) also study this matter in Thailand, and they found out that the most important barrier results from management addressed to production and other matters rather than energy efficiency.

Aiming at removing some of these barriers, government policies might help the achievement of energy efficiency. Worrell and Price (2001) investigate scenarios related to energy use, taking into account the US public policy, seeking the potential of public policies and technological programs for the efficient use of energy. Bashmakov and Myshak (2014) evaluate if energy efficiency policies launched in Russian Federation are effective.

Mills et al. (2008) list some best practices that corporations should adopt to formulate corporate strategies addressing energy management. Demirbas (2008) analyzes energy priorities that must be researched, as well as issues that occur in the environment due to lack of energy. Aflaki et al. (2013) discuss the challenges of seeking and implementing profitable energy efficiency projects.

Viklund (2015) studies excess heat utilization from an industrial perspective, seeking to present how excess heat recovery are promoted or discouraged through policy instruments. Rogan et al. (2014) build a model that shows energy demand and supply in Ireland, allowing evaluating and providing insights for energy efficiency policies. Kesicki and Yanagisawa (2015) explain how the industrial sector is modeled according to the International Energy Agency's World Energy outlook, and presents opportunities for energy saving in the sector.

Since the ISO 50001 was created, there are requirements that industry must follow to be certificated. In their article, Gopalakrishnan et al. (2014) describe a methodology referred to as the ISO 50001 Analyzer to facilitate the development of an ISO 50001 energy compliant management system.

A few other studies show how the application of Energy Efficiency programs are made in the countries researched. Fleiter et al. (2012) evaluate the program established in Germany to provide grants for energy audits in small and medium enterprises and how to overcome barriers to energy efficiency. In the Hasanbeigi et al. (2011) research, the potential application of a set of energy efficiency measures is

evaluated for the Thai cement industry, and the potential improvement of these measures is estimated.

Stenqvist and Nilsson (2012) conduct a study to evaluate the effectiveness of the Swedish Program for improving energy efficiency in energy intensive industries (PFE), and its effectiveness, while Johansson (2015) focus in unveil the reasons why energy-management practices are not implemented in iron and steel companies in Sweden. Blomqvist and Thollander (2015) try to overcome the barriers to energy efficiency creating a dataset containing data related to energy efficiency from Sweden and USA and publishing it on the Web.

Hertel and Menrad (2015) study the barriers that prevent small and medium enterprises to adopt energy efficiency practices in Germany. Liu (2015) reviews how utility efficiency programs in nine jurisdictions of North America react to seasonal peak-energy. Neelis et al. (2007) study energy efficiency trends in Dutch manufacturing industry between 1995 and 2003 using indicators publicly available, physical production and specific energy consumption data.

Some studies used Data Envelopment Analysis (DEA) in their works. Mukherjee (2008) uses it to measure energy efficiency in different states of India, and learn how the Indian manufacturing sector is handling energy efficiency in different parts of the country. Similar studies were carried out by Hu et al. (2012) in Taiwan, Wang et al. (2012) in China and Özkara and Atak (2015) in Turkey. Moreover, Honma and Hu (2013) perform a similar research in Japan, using DEA to measure 'Total factor energy efficiency' in different manufacture sectors. Martinez (2011) utilizes DEA to measure energy efficiency development in non-energy-intensive sectors (NEISs) in Germany and Colombia from a production-based theoretical framework. Teske et al. (2011) present a review of energy efficiency measures divided by global sector and region that resulted in a global energy demand scenario.

Some authors propose algorithms to improve energy efficiency and management. Niknam et al. (2012) propose an algorithm for better energy management by using microgrids, which is a cluster of electrical load. Shui et al. (2015) propose a mathematical method to estimate the energy demand and production frontier and thus evaluate energy efficiency in the automotive manufacturing sector using plant-level production and utility consumption data.

May et al. (2015) and Zhang and Chiong (2015) use a genetic algorithm (GA) to improve energy efficiency on the performances of a job-shop. The first considers the

objectives for productivity and energy consumption to investigate the effects of production scheduling policies and the second incorporates it with two problem-specific local improvement strategies to minimize energy consumption into the job-shop scheduling. Salido et al. (2015) use the GA to solve a job-shop scheduling problem, in which machines can consume different amounts of energy to process tasks at different rates.

Frigerio and Matta (2015a) propose a machinery management method through an algorithm in order to find ways to turn off the machines when they are not being used and connect them again when they are needed, thus generating energy savings. The authors continue the previous study by analyzing the machinery management in accordance with product production lines (Frigerio and Matta; 2015b).

A lot of models and frameworks were proposed to improve energy efficiency and management. Ngai et al. (2012) use the soft systems methodology (SSM) to identify management support system opportunities for managing energy and utility usage. Ngai et al. (2013) propose an energy and utility maturity framework that measures systematically the consumption of natural resources and guides organizational advancement in energy and utility management. Sundberg and Wene (1994) propose a nonlinear programming model, called MIMES (Model for description and optimization of Integrated Material flows and Energy systems), in order to provide a tool to assist decisions on systems with nested materials and energy flows.

Seow and Rahimifard (2011) adopt an approach to model energy flows in a manufacturing system aiming at lean energy consumption. It utilizes the energy consumption data at 'plant' and 'process' levels to provide a deeper analyses of the energy used during production. Wang et al. (2015) also aim at lean energy using a method to research the process of energy consumption in manufacturing/remanufacturing systems, using simulation to test its accuracy.

In Zhong et al. (2015), the authors intend to assist practitioners in selecting models to calculate energy consumption in metal cutting processes for a particular situation and purpose, with a method explained systematically in the article. Arigliano et al. (2014) propose a framework to help modeling and optimizing systems of energy production, storage and consumption. Lee and Prahbu (2015) propose an energy-aware feedback control model for production scheduling and capacity control.

Moreover, researchers propose a few frameworks. Bonvoisin et al. (2013) propose to integrate an energy conservation framework already in the design of a new

product, generating results as eco-design and cleaner production initiatives. Liu et al. (2013) come up with a framework to make the building design energy efficient, seeking to incorporate production scheduling to make manufacturing more energy efficient. Uluer et al. (2015) propose a framework for reducing energy use in manufacturing through three pillars: creating an energy profile of a process chain, energy-aware part designs and process plans based on ISO/STEP 10303 AP224 standards. Vikhorev et al. (2013) present a framework for energy monitoring and management of each individual productive asset and related energy using processes in the factory.

Gahm et al. (2016) develop a framework for energy efficiency scheduling (EES). Shrouf and Miragliotta (2015) present a framework for integration of Internet of Things technology with energy-efficient production management practices. Salta et al. (2009) develop a framework based on physical energy efficiency indicators to measure energy use in different industrial sectors in Greece. Miah et al. (2015) present a framework that incorporates technological interventions for factories to evaluate heat integration opportunities including low grade and waste heat, aiming to improve energy efficiency.

Soytas and Sari (2007) investigate through a multivariate framework the relationship between energy and production at industry level in Turkey. Ardehali and Smith (2007) create a framework for classifying Energy Efficiency Measures (EEM) based on their physical and inherent characteristics. Lee and Onisko (1994) discuss life-cycle cost analysis as a framework for highlighting differences between the economic criteria and perspectives of consumers and utilities to design energy-efficiency programs.

There are other methods and approaches proposed to optimize the consumption of energy in industry. Yang et al. (2013a) propose a new facility planning approach for energy intensive companies. Yang et al. (2013b) utilize a multi attribute decision-making approach to solve the facility layout design problem considering both traditional layout criteria and energy relevant criteria. The article of Fysikopoulos et al. (2014) shows an approach to study manufacturing energy efficiency with a division of energy efficiency definition into four manufacturing levels: process, machine, production line, and factory. Zampou et al. (2014) propose a study in which information systems are energy-aware, and integrate data-capturing technologies, process based energy measurement and optimization of operations.

Tristo et al. (2015) show a method for measuring the energy consumption of energy intensive micro manufacturing processes. Sivill et al. (2013) propose the

development of an energy performance measurement in the energy intensive industrial sector. Raileanu et al. (2015) present an agent-based approach for measuring in real time energy consumption of resources in job-shop manufacturing processes in order to seek for easier and fastest ways to optimize energy consumption. Perrels (2008) explains in his article pros and cons of tradable white certificates to achieve energy efficiency.

O'Driscoll et al. (2013) endorse that the manufacturing sector should focus on energy transparency being achieved by connecting an effective energy metering system to monitor and control the energy requirements of a manufacturing plant. With more energy visibility, it turns out to become easier to identify opportunities to improve energy efficiency. Jeon et al. (2014) seek a way to improve the energy efficiency of manufacturing plants using energy footprints of the plant. Aguirre et al. (2011) "present a methodology to measure relative industrial energy efficiency across plants within a manufacturing sector through the use of energy-production signatures (EPSs)".

The machining process is known for its need of a lot of energy to work. Taking this into account, a lot of researchers focus their work on finding ways of optimize these operations. In example, Yingjie (2014) gathers several articles studying energy efficiency models in machining processes, while Peng and Xu (2014) demonstrate frameworks that promote energy-efficient machining, focusing on models of four categories - theoretical, empirical, event based discrete, and hybrid models. Jia et al. (2014) propose a method to optimize the consumption of energy in machining processes through an energy-demand-modeling method utilizing the Therblig, one of the basic concepts of motion study, to represent the basic unit of energy. The authors continue their study in 2015, proposing a "method for machining activity extraction and energy attributes inheritance to support the intelligent energy estimation of machining processes" (Jia et al., 2015).

Newman et al. (2012) presents a framework to validate the introduction of energy consumption in the objectives of process planning for CNC machining. Zhang and Ge (2015) develop a new process planning strategy with energy efficiency consideration on a machining process, where the energy consumption of a machine is approximately estimated through calculation according to its material removal rate (MRR).

Larek et al. (2011) describe an approach based on the discrete-event simulation to generate a workpiece-specific power consumption profiles and energy footprints in

machining operations. Finally, Li et al. (2014) come up with a framework that analyses energy consumption characteristics in machining manufacturing systems from a holistic point of view, seeking a more energy efficient machines.

Beyond the machining processes, researches proposed other kinds of technical improvements that could upgrade energy efficiency in industry, such as Schall and Hirzel (2012), who investigate the cost and effectiveness of thermal cooling systems for industrial companies and how these actions influence energy efficiency. Moura et al. (2013) present an overview on the main features of smart grids, a novel electric grid paradigm, to integrate energy efficiency on the enabler technologies. Ultimately, Cui and Goldsmith (2006) propose a cooperative multiple-input multiple-output (MIMO) technique where multiple nodes within a cluster to reduce both energy consumption and delay.

#### 4 CONCLUSIONS

Energy is becoming an asset increasingly scarce and expensive, and because of this, it is necessary to consider ways to use energy more efficiently. Considering this, the study focused on finding in literature frameworks, models and methods to apply energy efficiency in enterprises and industries. The methodology used was a systematic literature review.

The contribution of the paper is to be an overview with several articles that can be used for later reference. The limitations of the study exist due to the exclusion criteria, which could cut out some good articles. Taking this into account, a suggestion for a future work is to expand this research, choosing articles not limited to the *Scimago's* classification of journals.

#### Bibliography

- Aflaki, S., P. R. Kleindorfer, V. S. M. Polvorinos. 2013. Finding and Implementing Energy Efficiency Projects in Industrial Facilities. *Production and Operations Management* **22**(3): 503-517.
- Aguirre, F., J. R. Villalobos, P. E. Phelan, R. Pacheco. 2011. Assessing the relative efficiency of energy use among similar manufacturing industries. *International Journal of Energy Research* **35**(6): 477-488.
- Ardehali, M. M., T. F. Smith. 2007. Development of framework for realization and classification of static and dynamic energy efficiency measures. *Energy Conversion and Management* **48**(10): 2630-2637.
- Arigliano, A., P. Caricato, A. Grieco, E. Guerriero. 2014. Producing, storing, using and selling renewable energy: The best mix for the small medium industry. *Computers in Industry* **65**(3): 408-418.

- Bashmakov, I., A. Myshak. 2014. Russian energy efficiency accounting system. *Energy Efficiency* **7**(5): 743-759.
- Blomqvist, E., P. Thollander. 2015. An integrated dataset of energy efficiency measures published as linked open data. *Energy Efficiency* **8**(6): 1125-1147.
- Bonvoisin, J, S. Thiede, D. Brissaud, C.Herrmann. 2013. An implemented framework to estimate manufacturing-related energy consumption in product design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **26**(9): 866-880.
- Çengel, Y. A. 2011. Energy efficiency as an inexhaustible energy resource with perspectives from the U.S. and Turkey. *International Journal of Energy Research* **35**(2): 153-161.
- Chai, K. H., C. Baudelaire. 2015. Understanding the energy efficiency gap in Singapore: a Motivation, Opportunity, and Ability perspective. *Journal of Cleaner Production* **100**: 224-234.
- Cui, S., A.J. Goldsmith. 2006. Cross-layer design of energy-constrained networks using cooperative MIMO techniques. *Signal Processing* **86**(8): 1804-1814.
- Demirbas, A. 2007. Energy Issues and Energy Priorities. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* **3**(1): 41-49.
- Dincer, I. 2003. On energy conservation policies and implementation practices. *International Journal of Energy Research* **27**(7): 687-702.
- Fleiter, T., E. Gruber, W. Eichhammer, E. Worrell. 2012. The German energy audit program for firms—a cost-effective way to improve energy efficiency? *Energy Efficiency* **5**(4): 447-469.
- Frigerio, N., A. Matta. 2015a. Analysis on Energy Efficient Switching of Machine Tool With Stochastic Arrivals and Buffer Information. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Available online
- Frigerio, N., A. Matta. 2015b. Energy-efficient control strategies for machine tools with stochastic arrivals. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* **12**(1): 50-61.
- Fysikopoulos, A., G. Pastras, T. Alexopoulos, G. Chryssolouris. 2014. On a generalized approach to manufacturing energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **73**(9-12): 1437-1452.
- Gahm, C., F. Denz, M. Dirr, A. Tuma. 2016. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. *European Journal of Operational Research* **248**(3): 744-757.
- Gopalakrishnan, B., K. Ramamoorthy, E. Crowe, S. Chaudhari, H. Latif. 2014. A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **7**: 154-165.
- Hasanbeigi, A., C. Menke, P. du Pont. 2010. Barriers to energy efficiency improvement and decision-making behavior in Thai industry. *Energy Efficiency* **3**(1): 33-52.
- Hasanbeigi, A., C. Menke, A. Therdyothin. 2011. Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency* **4**(1): 93-113.
- Hertel, M., K. Menrad. 2015. Adoption of energy-efficient technologies in German SMEs of the horticultural sector—the moderating role of personal and social factors. *Energy Efficiency*: Available Online.
- Hirst, E., M.A. Brown. 1990. Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. *Resources, Conservation and Recycling* **3**(4): 267-281.
- Honma, S., J. L. Hu. 2013. Total-factor energy efficiency for sectors in Japan. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy* **8**(2): 130-136.
- Hu, J. L., M.C. Lio, C.H. Kao, Y.L. Lin. 2012. Total-factor Energy Efficiency for Regions in Taiwan. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* **7**(3): 292-300.
- Jeon, H. W., M.Taisch, V.V Prabhu. 2014. Modelling and analysis of energy footprint of manufacturing systems. *International Journal of Production Research* **53**(23): 7049-7059
- Jia, S., R. Tang, J. Lv. 2015. Machining activity extraction and energy attributes inheritance method to support intelligent energy estimation of machining process. *Journal of Intelligent Manufacturing*: Available Online.
- Jia, S., R. Tang, J. Lv. 2014. Therblig-based energy demand modeling methodology of machining process to support intelligent manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* **25**(5): 913-931.
- Johansson, M. 2015. Improved energy efficiency within the Swedish steel industry—the importance of energy management and networking. *Energy Efficiency* **8**(4): 713-744.

- Kannan, R., W. Boie. 2003. Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management* **44**: 945–959.
- Kesicki, F.; A. Yanagisawa. 2015. Modelling the potential for industrial energy efficiency in IEA's World Energy Outlook. *Energy Efficiency* **8**(1): 155-169.
- Larek, R., E. Brinksmeier, D. Meyer, T. Pawletta, O. Hagendorf. 2011. A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. *Production Engineering* **5**(5): 575-579.
- Lee, A. D., S. A. Onisko. 1994. Economics and utility energy- efficiency programmes housing. *Utilities Policy* **4**(2): 133-139.
- Lee, S., V. V. Prabhu. 2015. Energy-aware feedback control for production scheduling and capacity control. *International Journal of Production Research*: 1-13.
- Li, Y., Y. He, Y. Wang, P. Yan, X. Liu. 2014. A framework for characterizing energy consumption of machining manufacturing systems. *International Journal of Production Research* **52**(2): 314-325.
- Liu, H., Q. Zhao, N. Huang, X. Zhao. 2013. A simulation-based tool for energy efficient building design for a class of manufacturing plants. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* **10**(1): 117-123.
- Liu, Y. 2015. Seasonal relationship of peak demand and energy impacts of energy efficiency measures—a review of evidence in the electric energy efficiency programmes. *Energy Efficiency*: 1-21.
- Martínez, C.P. 2011. Energy efficiency development in German and Colombian non-energy-intensive sectors: a non-parametric analysis. *Energy Efficiency* **4**(1): 115-131.
- May, G., B. Stahl, M. Taisch, V. Prabhu. 2015. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research* **50**(23): 7071-7089.
- Miah, J. H., A. Griffiths, R. McNeill, I. Poonaji, R. Martin, A. Leiser, S. Morse, A. Yang, J. Sadhukhan. 2015. Maximising the recovery of low grade heat: An integrated heat integration framework incorporating heat pump intervention for simple and complex factories. *Applied Energy* **160**: 172-184.
- Mills, E., G. Shamshoian, M. Blazek, P. Naughton, R. S. Seese, W. Tschudi, D. Sartor. 2008. The business case for energy management in high-tech industries. *Energy Efficiency* **1**(1): 5-20.
- Minchener, A. J. 2000. Technology transfer issues and challenges for improved energy efficiency and environmental performance in China. *International Journal of Energy Research* **24**(11): 1011-1027.
- Moura, P.S., G. L. López, J. I. Moreno, A. T. De Almeida 2013. The role of Smart Grids to foster energy efficiency. *Energy Efficiency* **6**(4): 621-639.
- Mukherjee, K. 2008. Energy use efficiency in the Indian manufacturing sector: An interstate analysis. *Energy Policy* **36**(2): 662-672.
- Neelis, M., A. Ramirez-Ramirez, M. Patel, J. Farla, P. Boonekamp, K. Blok 2007. Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980-2003. *Energy Policy* **35**(12): 6112-6131.
- Newman, S. T., A. Nassehi, R. Imani-Asrai, V. Dhokia. 2012. Energy efficient process planning for CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **5**(2): 127-136.
- Ngai, E. W. T., C.K.M. To, V.S.M. Ching, L.K. Chan, M.C.M. Lee, Y.S. Choi, P.Y.F. Chai. 2012. Development of the conceptual model of energy and utility management in textile processing: A soft systems approach. *International Journal of Production Economics* **135**(2): 607.
- Ngai, E. W. T., D.C.K. Chau, J.K.L. Poon, C.K.M To. 2013. Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. *International Journal of Production Economics* **146**(2): 453-464.
- Niknam, T., F. Golestaneh, A. Malekpour. 2012. Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm. *Energy* **43**(1): 427.
- O'Driscoll, E., D. O. Cusack, G. E. O'Donnell. 2013. The development of energy performance indicators within a complex manufacturing facility. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **68**(9-12): 2205-2214.
- Özkara, Y., M. Atak. 2015. Regional total-factor energy efficiency and electricity saving potential of manufacturing industry in Turkey. *Energy* **93**: 495-510.
- Patterson, M. G. 1996. What is energy efficiency? - Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy* **24**(5): 377-390.
- Peng, T., X. Xu. 2014. Energy-efficient machining systems: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **72**(9-12): 1389-1406.

- Perrels, A. 2008. Market imperfections and economic efficiency of white certificate systems. *Energy Efficiency* **1**(4): 349-371.
- Raileanu, S., F. Anton, A. Iatan, T. Borangiu, S. Anton, O. Morariu. 2015. Resource scheduling based on energy consumption for sustainable manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*: Available Online
- Rogan, F., C.J. Cahill, H.E. Daly, D. Dineen, J. P. Deane, C. Heaps, M. Welsch, M. Howells, M. Bazilian, B.P. Ó Gallachóir. 2014. LEAPs and Bounds—an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. *Energy Efficiency* **7**(3): 441-466.
- Salido, M., J. Escamilla, A. Giret, F. Barber. 2015. A genetic algorithm for energy-efficiency in job-shop scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: Available Online
- Salta, M., H. Polatidis, D. Haralambopoulos. 2009. Energy use in the Greek manufacturing sector: A methodological framework based on physical indicators with aggregation and decomposition analysis. *Energy* **34**(1): 90-111.
- Sardianou, E. 2008. Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. *Journal of Cleaner Production* **16**: 1416-1423.
- Schall, D., S. Hirzel. 2012. Thermal cooling using low-temperature waste heat: a cost-effective way for industrial companies to improve energy efficiency? *Energy Efficiency* **5**(4): 547-569.
- Seow, Y., S. Rahimifard. 2011. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **4**(3): 258-264.
- Shrouf, F., G. Miragliotta. 2015. Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production* **100**: 235-246.
- Shui, H., X. Jin, J. Ni. 2015. Manufacturing productivity and energy efficiency: a stochastic efficiency frontier analysis. *International Journal of Energy Research* **39**(12): 1649-1663.
- Sivill, L., J. Manninen, I. Hippinen, P. Ahtila. 2013. Success factors of energy management in energy-intensive industries: Development priority of energy performance measurement. *International Journal of Energy Research* **37**(8): 936-951.
- Soytas, U., R. Sari. 2007. The relationship between energy and production: Evidence from Turkish manufacturing industry. *Energy Economics* **29**(6): 1151-1165.
- Stenqvist, C., L. Nilsson. 2012. Energy efficiency in energy-intensive industries—an evaluation of the Swedish voluntary agreement PFE. *Energy Efficiency* **5**(2): 225-241.
- Sundberg, J., C. O. Wene. 1994. Integrated modelling of material flows and energy systems (MIMES). *International Journal of Energy Research* **18**(3): 359-381.
- Teske, S., T.Pregger, S. Simon, T. Naegler, W. Graus, C. Lins. 2011. Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency* **4**(3): 409-433.
- Thollander, P., E. Dotzauer. 2010. An energy efficiency program for Swedish industrial small- and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production* **18**: 1339-1346.
- Thollander, P., M. Ottosson. 2008. An energy efficient Swedish pulp and paper industry – exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. *Energy Efficiency* **1**(1): 21-34.
- Tranfield, D., D. Denyer, P. Smart. 2003. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management* **14**: 207-222.
- Trianni, A., E. Cagno, A. De Donatis. 2014. A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy* **118**: 207-220.
- Tristo, G., G. Bissacco, A. Lebar, J. Valentiničič. 2015. Real time power consumption monitoring for energy efficiency analysis in micro EDM milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **78**(9-12): 1511-1521.
- Uluer, M. U., H.O. Unver, G. Gok, N. Fescioglu-Unver, S.E. Kilic. 2015. A framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry. *Journal of Cleaner Production*: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.106>.
- Vikhorev, K., R. Greenough, N. Brown. 2013. An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production* **43**: 103-112.
- Viklund, S.B. 2015. Energy efficiency through industrial excess heat recovery—policy impacts. *Energy Efficiency* **8**(1): 19-35.
- Wang, X., W. Luo, H. Zhang, B. Dan, F. Li. 2015. Energy consumption model and its simulation for manufacturing and remanufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: Available Online.

- Wang, Z.-H., H.-L. Zeng, Y.-M. Wei, Y.-X. Zhang. 2012. Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China. *Applied Energy* **97**: 115-123
- Worrell, E., L. Price. 2001. Policy scenarios for energy efficiency improvement in industry. *Energy Policy* **29**(14): 1223-1241.
- Yang, L., J. Deuse, P. Jiang. 2013a. Multi-objective optimization of facility planning for energy intensive companies. *Journal of Intelligent Manufacturing* **24**(6): 1095-1109.
- Yang, L., J. Deuse, P. Jiang. 2013b. Multiple-attribute decision-making approach for an energy-efficient facility layout design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **66**(5-8): 795-807.
- Yingjie, Z. 2014. Energy efficiency techniques in machining process: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **71**(5-8): 1123-1132.
- Zampou, E., S. Plitsos, A. Karagiannaki, I. Mourtos. 2014. Towards a framework for energy-aware information systems in manufacturing. *Computers in Industry* **65**(3): 419-433.
- Zhang, R., R. Chiong. 2015. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: a multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. *Journal of Cleaner Production*: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.097>.
- Zhang, Y., L. Ge. 2015. Method for process planning optimization with energy efficiency consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **77**(9-12): 2197-2207.
- Zhong, Q., Q. Zhong, R. Tang, J. Lv, S. Jia, M. Jin. 2015. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: Available Online.

## APÊNDICE C – ARTIGO COM PROPOSTA DE MODELO PRELIMINAR – ICPR AMERICAS

### ***Framework de eficiência energética nos processos de usinagem: um modelo proposto***

Energy efficiency framework on machining processes: a proposed model

Giulia Cavichiolo Saldanha<sup>1</sup>; Aline Patrícia Mano<sup>2,5</sup> Sergio Eduardo Gouvea da Costa<sup>3,4</sup>, Edson Pinheiro de Lima<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil;

<sup>2</sup>Doutoranda em Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil;

<sup>3</sup>Professor da Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil

<sup>4</sup>Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, km 1, Pato Branco – 85503-390, Brasil

<sup>5</sup>Professora da Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus -45662-900, Brasil

### **Resumo**

A indústria transformadora depende da energia, um recurso cada vez mais escasso. Se o processo a ser estudado envolve a usinagem, a quantidade de energia utilizada é ainda mais significativa. Tendo isso em conta, as empresas devem utilizar esta energia de uma forma mais eficiente. O artigo tem como objetivo propor um modelo adequado para melhorar o uso de energia em uma linha de usinagem. Existem vários modelos na literatura que propõem melhorias nas linhas de usinagem existentes, mas pouco tem sido estudado sobre como fazer um novo projeto de linha ser instalado com um nível melhor de eficiência energética. Conseqüentemente, o objetivo deste trabalho é definir um novo modelo que utilize a simulação para aperfeiçoar o consumo de energia em uma nova linha de usinagem, com base em modelos de eficiência energética já presentes na literatura.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Estrutura, Processos de usinagem.

### **Abstract**

The manufacturing industry depends on energy, an increasingly scarce resource. If the process to be studied involves machining, the amount of energy used is even more significant. Taking this into account, companies are seeking to use this energy in a more efficient way. The article aims to propose an appropriate framework to improve

energy use in a machining line. There are several models in the literature proposing improvements in existing machining lines, but little has been studied about how to make a new line project be installed with a more optimal level of energy efficiency. Consequently, the aim of this paper is to define a new model that uses simulation to perfect energy consumption in a new machining line, based on energy-efficient models already present in the literature.

**Keywords:** Energy Efficiency, Framework, Machining processes.

## 1 INTRODUCTION

The lack of energy reaches a global scale, and this stems from the fact that much of the energy production depends on non-renewable sources. The smaller the amount of energy provided, the more expensive it becomes, affecting the means dependent on it, like the industry. Therefore, it is important that industries become more energy efficient, to the benefit of both its competitiveness and the global environment [1].

Industrial manufacturing is one of the main economic activities of our time, and lots of energy demand is needed to transform and create products. Worldwide, the industry sector consumed about 98 exajoules (EJ) in 2008, representing 28% of the total energy consumption [2]. For this reason, the search for ways to reduce energy spending is vital to the economic sustainability of companies.

Considering this, emerge areas of study, such as energy efficiency, looking for ways to optimize the use of energy within the environment where it is used. Several authors have been investigating this issue and proposing models for their application, seeking the lowest possible use of energy, without bringing about any impact on production.

For Patterson (1996) [3], energy efficiency is a generic term, and there is no quantitative measurement of "energy efficiency" that is not incorrect. In fact, according to the author, many indicators should be taken into account in the quantification of changes in energy efficiency. In general, energy efficiency refers to the use of less energy to produce the same amount of service or useful output. In the industrial sector, for example, energy efficiency may be understood as the measure of the amount of energy required to produce one ton of a certain product.

The machining lines need more attention since the machines operate intensively; the power consumption is very significant within the company's budget. Peng and Xu (2014) [4] emphasize that “the energy-efficient machining system requires a comprehensive understanding as well as optimization of energy consumption”.

With this in view, the present work aims to verify models applied in different areas of industry, through a bibliographical research on this topic. Based on the literature, the goal is to propose a new framework aimed at energy efficiency in machining lines in the industry, with bias in projects that are yet to be deployed. For this, it was used simulation software as a tool.

## 2 THEORETICAL BACKGROUND

In his article, Abdelaziz et al. (2011) [5] state that:

Energy is a fundamental need for different purposes in industrial facilities around the world. A huge amount of energy needed for countries with faster economic growth. Energy is thus a crucial factor for economic competitiveness and employment. However, global population and energy needs are increased hand-in-hand. This concern must be addressed by the international community to overcome any shortage of energy resources in the future.

The control and monitoring are issues in which the company should focus on, since when investments are insufficient, it can result in the lack of awareness of the real potential for profitable investments in energy. However, even if there is an active control, managers may still have difficulties in assessing the impact and effects of energy efficiency improvement measures, because of the absence of adequate evaluation concepts. For these reasons, energy efficiency frameworks are developed [6].

The management of energy is an useful way to monitor energy expenditure, maximize profits, and improve competitive positions through organizational measures and optimization of energy efficiency. Furthermore, it is a dynamic process that generates new knowledge, promoting efficiency gains [7]. Besides, the energy management area needs to be focused, because the integration of energy efficiency to the management of production is an important lever to improve production systems, making them suitable for energy efficiency programs since it can be a basis for the successful implementation of improvement measures [6].

When successful, profitable energy efficiency investments meet the challenge of maintaining the production of high-quality products with low production costs. Energy efficiency technologies often include "additional benefits", further increasing the productivity of a company [8]. Also, innovative industrial technologies intend not only to reduce energy consumption, but also to improve productivity, to cut capital costs and operating expenses, to improve reliability, and to reduce emissions and improve working conditions [9].

From a business point of view, greater energy efficiency is of utmost importance; this generates direct economic benefits, and an increase in competitiveness and productivity [7;10].

Analyzing the global context, and especially the Brazilian context, there is room for the study of energy efficiency in the industrial area, taking into account the considerable amount of energy consumption. When planning new projects, anticipating that they are more efficient in energy expenditure, it is necessary to seek ways to test this application. One of the possible ways to do so is by performing simulations.

Tanaka (2008) [11] discusses the importance of using energy efficiency performance measures, which shows types of indicators that can be utilized in the industry. They fall into four categories: thermal efficiency of equipment power, the intensity of energy consumption (the unit's power consumption and specific energy consumption), the absolute amount of energy consumption, and rate of facilities diffusion/types of energy-efficient equipment.

However, one cannot manage what is not measured, so data collection is critical to energy management. Industries' power data are collected in all sub-processes levels of granularity for the global industry sector, depending on the nature of the analysis performed. At the degree of the industry sector, organizations such as the International Energy Agency (IEA) collect, analyze and disseminate information on energy in companies, organizations performing energy audits to understand energy flows on the premises, on production systems or processes, thus reducing the amount of energy used without negatively affecting productivity [1].

The study of this paper is going to be mainly focused on machining lines. This type of procedure is common in many discrete manufacturing industries, as well as being responsible for the use of a lot of energy to operate. The advanced machining centers, usually controlled by computers, allow the manufacture of high-precision parts and, along with robots and carriers, help to achieve the high production rates required

by mass production. Most studies on energy efficiency, on the process level, can be grouped in modeling and optimization issues [12].

In literature, there are many studies aimed at improving energy use in the operation and some focused work in using simulation as a tool to improve energy efficiency. Gomes (2015) [13] simulates manufacturing lines in operation to make the analysis of how certain changes can have an impact on energy consumption.

However, the focus of this work is to use simulation software, as a support for the analysis of new manufacturing projects, so that the new production lines can begin to operate with a higher level of energy efficiency than if these studies had not been carried out.

### **3 METHODOLOGY**

The aim of this paper is to propose a model for energy efficiency improvement in a machining line project. This line still does not exist, so the tests are to be performed through a simulation software.

For the creation of this model, several models proposed by other authors were used as a basis, to finally come up with this new design adapted to its particular purpose.

The models that were the foundation for this new one were found by a systematic literature review as well as doctorate thesis, which used methods similar to what is employed in this work.

For each of the models used as a reference, one or more characteristics were used. The papers used were the Larek et al. (2011) [14], Gomes (2015) [13], Carvalho (2015) [2], Vikhorev et al. (2013) [1], May (2015) [15], and the work carried out by the Fraunhofer Institute (2014) in partnership with the Technological Institute of Aeronautics in Brazil (ITA) [16]. The characteristics of each model and the model proposed are presented in the next session.

## 4 PROPOSED MODEL

### 4.1. Referenced models

Several papers were used as reference for the development of the proposed model. In each of these works, important features were selected to compose the new model.

Larek et al. (2011) [14] describe an approach based on discrete event simulation model adapted to machining operations and generate accurate power consumption profile piece and energy footprints. The goal is to provide a basis for new applications such as simulation, comparison, and optimization of energy consumption in production processes and systems chains in combination with logistic models. The feature used in this model is the model structure.

The work of May et al. (2015) [15] investigate the effects of targeted production scheduling policies to improve the productive and environmental performance in a jobshop. They use a genetic algorithm to evaluate the problems of several goals related to sustainability. In the algorithm, the information states of the machines studied, and the power consumption of each of the states are inserted. This feature is used in the model developed in this article.

Different states described in the work are [15]:

- a) Idle: The machine is active and ready to work (there are missing parts, or the machine is locked to the release of finished parts).
- b) Break: The machine failed in one of the different ways that affect production.
- c) Set-up: The machine is changing the tool to process a new piece.
- d) Maintenance: the machine is being repaired or undergoing scheduled maintenance.
- e) Working: the machine is processing a job.

A framework for advanced power management is described in the article of Vikhorev et al. (2013) [1] which allows energy managers at all levels to identify energy usage patterns at different levels of analysis in its plant, thus making meaningful decisions based on performance indicators that are relevant to them. The use of performance indicators to drive energy efficiency study is the selected feature of this article.

The work carried out by the Fraunhofer Institute along with ITA and the Brazilian Renault's plant uses a methodology called RVSM (Resource Stream Value Mapping) to seek improvements in resource utilization, such as energy, in manufacturing lines. This method follows the VSM process of making the analysis of the current state of a line seeking improvements to the elaboration of a future state. The structure that pursues improvements in the present condition of a production line to be applied in a future state of this line will be the basis of the new model developed in this paper [16].

The goal of Carvalho's work (2015) [2] is to propose a method for evaluating and enhancing energy efficiency of flexible discrete systems in the manufacture of machining. The paper proposes three indicators that can be used as energy efficiency assessment parameters that will be utilized in the proposed model. The indicators are:

- a) kWh/kg: kWh spending amount for each kg of material removed during machining.
- b) kWh/piece: kWh amount spent for each piece produced.
- c) \$Energy/\$/Total: Cost of energy in relation to the total cost.

Finally, the last model on which this work is based belongs to Gomes (2015) [13]. Similarly to this work, Gomes' (2015) simulation aims at improving energy efficiency. The author proposes a continuous improvement model, in which the line characteristics are simulated to seek for improvements in the energy use of an existing line. The structure of the model proposed can be seen in Figure 1.

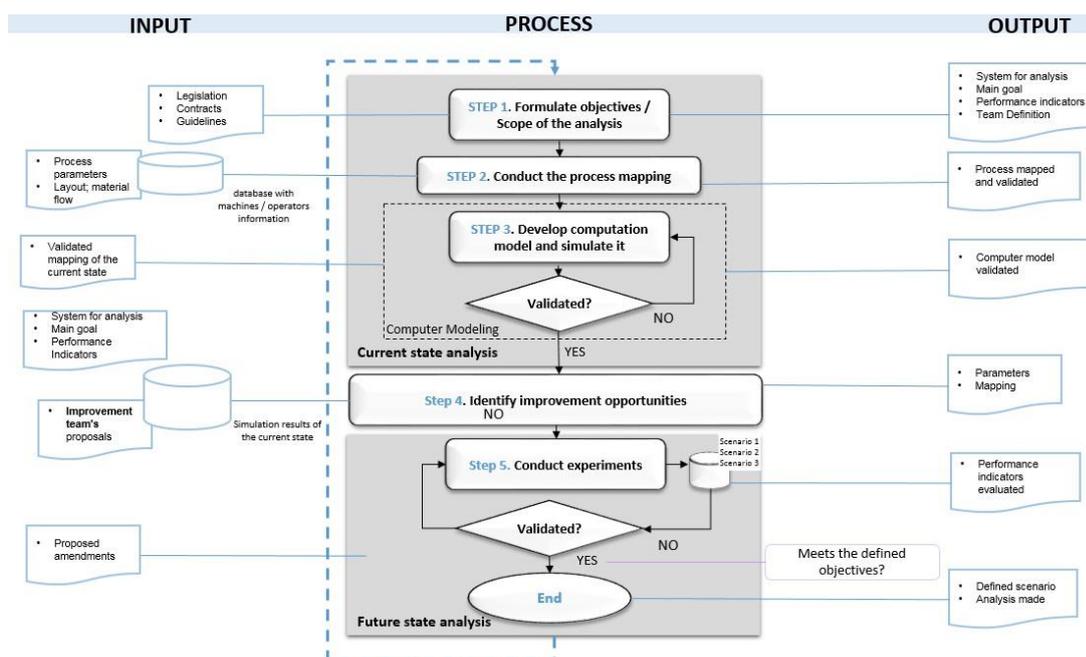


Fig. 1. Model proposed by Gomes (2015) [13].

#### 4.2. Proposed model

Based on the characteristics established in works previously mentioned, a model for improving energy efficiency in a new machining line will be proposed.

The steps that involve the model start with the analysis of the current line. To start it, it is important to collect the data essential to elaborate the current line's RVSM and to assemble the simulation of this line. This process needs the parameters such as cycle times, break and repair machine times, tool setup times, and other necessary data for the preparation of the simulation. In the bias of energy efficiency, it is important to collect energy expenditure data line, in different states of the machines to check how the machine is spending energy over time. These data are used in RVSM and in the simulation.

To perform the simulation, a software that supports the energy expenditure of the line data, as plant simulation, is required.

After these steps, one must be sure that the simulation is as close to reality as possible so that the tests performed are accurate. While the simulation is not a faithful representation of reality, it must be adjusted. Once the adjustments are finished, the next step can be taken.

Starting out the study of the future state, the changes that the line will suffer are detected by selecting the changes that will be implemented. The next step then is to collect data that will be used in this future line. Taking into account that this line still does not exist, it is crucial to obtain the parameters with data from the initial setup of the machines, provided by the suppliers.

Based on this, one can make the RVSM for the future state of the line, and to develop a simulation of that line. As the changes are not implemented yet, changes in the layout, in the number of machines and in the programming of the machines can be carried out, and the tests outcomes may be checked for possible variations before implementation.

After the simulation is validated, the energy flow testing can be performed to verify if it complies with the production design flow. For this, there is the need to check the energy expenditure according to the states of the machines and use the indicators established by Carvalho (2015) [2] to analyze the impacts on the line of each of the changes.

Finally, one should analyze the results to find out the impact of the changes in energy consumption and then check the possibilities of further improvements, creating a cycle of continuous improvement tests and result analysis. The complete model is shown in Figure 2.

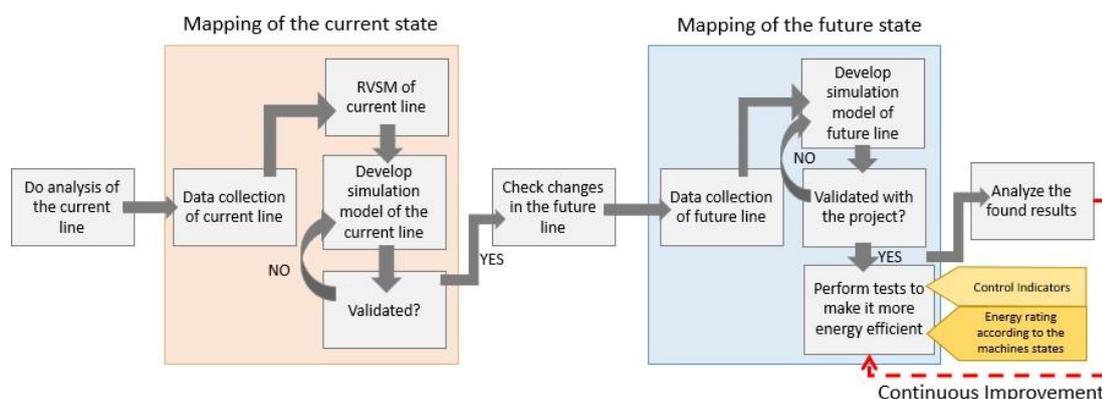


Fig. 2. Model proposed by the authors (2016).

## 5 CONCLUSION

There is a space in research for energy efficiency on a project of new machining lines research. Taking into account that these lines do not exist yet, a way to conduct research on the subject is using simulation as a means to carry out testing.

Based on this, a model was proposed by the authors as a way to conduct energy consumption analyses using simulation software. It is a preliminary model, and it still needs to be tested in a real situation in order to verify its accuracy. The testing is the next step to be performed by the authors.

## References

- [1] Vikhorev, K., Greenough, R., Brown, N. An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production* 2013;43:103-112.
- [2] Carvalho, H.M.B. Metodologia de Avaliação e Aumento da Eficiência Energética em Manufatura de Elementos Discretos: Aplicação em Usinagem, Tese de Doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2015.
- [3] Patterson M. G., What is energy efficiency? – Concepts, indicators and methodological issues, *Energy Policy* 1996;24(5):377-390.
- [4] Peng T, Xu X. Energy-efficient machining systems: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol* 2014; 72:1389–1406
- [5] Abdelaziz, E.A., Saidur, R., Mekhilef, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;5:150–168.
- [6] Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F.O. Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production* 2011;19:667-679.

- [7] Kannan, R., Boie, W. Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management* 2003;44:945–959.
- [8] Gordic, D., Babic, M., Jovicic, N., Šušteršic, V., Koncalovic, D., Jelic, D. Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management* 2010;51:2783–2790.
- [9] Worrell, E., Price, I. Policy scenarios for energy efficiency improvement in industry. *Energy Policy* 2001;29(14):1223-1241.
- [10] Worrell, E., Laitner, J.A., Ruth, M., Finman, H. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. *Energy* 2003;28:1081-1098.
- [11] Tanaka, K.. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy* 2008;36:2887-2902.
- [12] Uluer, M.U., Unver, H.O., Gok, G., Fescioglu-Unver, N., Kilic, S.E. A framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry. *Journal of Cleaner Production* 2016;112: 3342-3360.
- [13] Gomes, V.E.O. Método para o aumento de eficiência energética em sistemas de manufatura discreta em nível e produção. 160f. Tese de doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2015.
- [14] Larek, R., Brinksmeier, E., Meyer, D., Pawletta, T., Hagendorf, O. A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. *Prod. Eng. Res. Devel* 2011;5:575–579.
- [15] May, G., Stahl, B., Taisch, M., Prabhu, V.. Multiobjective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling, *International Journal of Production Research* 2015;53(23):7071-7089.
- [16] Fraunhofer Institute for Production Technology IPT. Technical Report: “Resource Value Stream Map. Systematic identification and optimization of consumers”. 2014. Available online in <<https://www.researchgate.net/publication/280546778>>. Access in February 18th, 2016.

## APÊNDICE D – ARTIGO SUBMETIDO AO PERIÓDICO *ENERGY EFFICIENCY*

### **Proposta e avaliação de um modelo utilizando simulação discreta para a redução de gasto energética**

Proposal and evaluation of a model using discrete simulation for energy expenditure reduction

Giulia Cavichiolo Saldanha<sup>1</sup>; Sergio Eduardo Gouvea da Costa<sup>2,3</sup>, Edson Pinheiro de Lima<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil;

<sup>2</sup>Professor da Engenharia de Produção e Sistemas– PUCPR; Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – 80215-901, Brasil

<sup>3</sup>Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, km 1, Pato Branco – 85503-390, Brasil

#### **Resumo**

A falta de energia atinge escala global e isso decorre do fato de boa parte de sua produção depender de fontes não renováveis. Quanto menor a quantidade oferecida de energia, mais cara ela se torna, impactando nos meios dela dependentes como, por exemplo, a indústria. Levando-se isso em conta, surge a necessidade de buscar ações que tornem a indústria, como um todo, mais eficiente quando se trata de energia. Existem diversos modelos na literatura que propõem melhorias na gestão de energia em linhas de produção já existentes, porém, pouco vem sendo estudado a respeito de como fazer uma nova linha de produção ser instalada com um grau mais aperfeiçoado de eficiência energética. O objetivo do artigo é propor um novo modelo que utiliza como ferramenta a simulação discreta para a redução do consumo de energia em uma nova linha de produtos. A simulação foi escolhida como ferramenta de apoio para o caso em que o modelo foi aplicado: uma nova linha de usinagem dentro de uma indústria automobilística na região metropolitana de Curitiba. O modelo proposto possui a característica de avaliar como a linha de produção opera atualmente e cria uma simulação fiel do que será a linha futura, possibilitando a realização de cálculos de custo energético nessa nova linha. Com esse modelo estabelecido, foram realizados experimentos no software de simulação para testar sua aplicabilidade, assim como realizar uma análise dos resultados. Os resultados apresentados pela pesquisa demonstram que entre os oito cenários testados, três deles podem ser utilizados em épocas de menor produção, acarretando num menor gasto de energia.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. Simulação. Novos projetos. Gestão de energia.

## Abstract

The lack of energy reaches a global scale, and it is because much of its production depends on non-renewable sources. The smaller the amount of energy supplied, the more expensive it becomes, impacting the areas that rely on it, for example, industries. Taking this into account, the need to pursue actions that make the industry as a whole more efficient when it comes to energy arises. There are several models in the literature proposing improvements in existing lines, but little has been studied about how to make the project of a new line to be installed with an improved level of energy efficiency. The aim of this paper is to define a new model that uses simulation to reduce energy consumption in a new production line. The simulation was chosen as a support tool for the study held in a new machining line, within an automotive industry located in the metropolitan region of Curitiba. The proposed model evaluates how the production line currently operates and creates a true simulation of how the future line will be, making it possible to perform energy calculations in this new line. With this model established, experiments were carried out using simulation software to test its applicability, as well as to perform an analysis of the results. The results show that among the eight scenarios tested, three of them can be used in times of lower production, resulting in less energy expenditure.

**Keywords:** Energy efficiency. Simulation. New projects. Energy Management.

## 1. INTRODUCTION

The lack of energy reaches global scale, and this stems from the fact that much of the energy production depends on non-renewable sources. The smaller the amount of energy offered, the more expensive it becomes, impacting on the means that depends on it, such as industry. Therefore, it is important for industries to become more energy-efficient, both for their competitiveness and for the global environment (Vikhorev et al. 2013).

Taking this into consideration, there are areas of study, such as energy efficiency, that look for ways to optimize energy use. Several authors have been studying this theme and proposing models for its application, aiming at the lowest energy use possible, without having an impact on production.

For Patterson (1996), energy efficiency is a generic term, and there is no quantitative measure of "energy efficiency" that is not misleading. Indeed, according to the author, some indicators must be taken into account in quantifying changes in energy efficiency. Generally speaking, energy efficiency refers to the use of less energy for the production of the same quantity of services or useful output. In the industrial sector, for example, energy efficiency can be understood as the amount of energy needed to produce one ton of a given product (Patterson 1996).

With this in mind, this paper aims to propose a new model that uses discrete simulation to evaluate the energy consumption in a new line machining of products.

The tool used to carry out the energy tests is simulation software, which allows verifying scenarios in a computational environment and perceiving the generated impacts without affecting the actual production line.

The work is organized as follows: in the next chapter, there is the theoretical background. Then the methodology used is presented, followed by the model proposed. Next, there is the description of the experiment performed, the analysis of the results, and the final conclusions of the paper.

## **2. THEORETICAL BACKGROUND**

The large demand for energy from emerging economies contributes to the shortage of it, prompting governments to look for ways to generate energy to meet their needs. Often, fossil fuels are used to fulfill this need, which generates carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and consequently, climate change. For this reason, attention to policies and issues related to industrial energy efficiency has been renewed. This area of study is considered one of the main ways to reduce this threat since there is vast untapped potential for energy efficiency in an industry (Mukherjee 2008; Jaffe and Stavins 1994).

The implementation of improvement in energy efficiency translates not only into operational cost savings, but also on improving the quality of products and services, competitive advantage and increased profit per share (Mills et al. 2008).

According to Worrell et al. (2009), industrial energy management is important because it plays a determining role to industry become less carbon-intensive. Also, the energy efficiency theme contributes to the reduction of energy use, generating more energy security (Tanaka 2008).

Industries are always geared to profit and to policy instruments, such as energy taxes and carbon emissions, which generate direct economic benefits for companies with more energy management. However, the task of promoting energy efficiency is difficult and prevented by many restrictions, some of political nature. Therefore, if the goal is to achieve significant improvements in energy efficiency, several different policy instruments should be used, including information on energy management and financial support for the development of energy management (Christoffersen et al. 2006).

When successful, profitable investment in energy efficiency meets the challenge of maintaining the production of high-quality products at reduced production costs. Energy efficiency technologies often include "additional benefits", further increasing the productivity of a company (Gordic et al. 2010). Moreover, innovative industrial technologies are aimed not only at reducing energy consumption but at improving productivity, reducing capital costs, reducing operational costs, improving reliability, reducing emissions and improving working conditions (Worrell and Price 2001).

However, you cannot manage what you do not measure, so data collection is critical to energy management. Industry energy data is collected at all levels of the global industry sector, depending on the nature of the analysis being performed. At the industry level, organizations such as the International Energy Agency (IEA) collect, analyze and disseminate energy information. In companies, organizations conduct energy audits to understand energy flows in facilities, production systems or processes to reduce the amount of energy used without adversely affecting productivity (Vikhorev et al. 2013).

Control and monitoring, therefore, are issues in which the company must invest because when they are insufficient, it can result in a lack of perception of the real potential for profitable investments in energy. However, even if there is an effective control, managers may still have difficulties in assessing the effects of measures to improve energy efficiency due to the lack of adequate assessment concepts. For these reasons, the energy efficiency frameworks are developed (Bunse et al. 2011).

Energy management is an effective way to monitor energy expenditure, maximize profits and improve competitive positions, through organizational measures and energy efficiency optimization. In addition, it is a dynamic process that generates new knowledge, promoting gains in efficiency (Kannan and Boie 2003). Also, the area of energy management needs to be focused because the integration of energy efficiency with production management is an important lever to improve production systems, leaving them suitable for energy efficiency programs since it can be the base for successful implementation of improvement measures (Bunse et al. 2011).

In literature, there are many studies aimed at improving the use of energy in operation, and some works focused on using simulation as a tool to improve energy efficiency. Gomes (2015) simulates manufacturing lines in operation to analyze how certain changes can have an impact on energy consumption.

Analyzing the world context and especially Brazil, there is room for the study of energy efficiency in the industrial area, taking into account the considerable consumption of it. When planning new projects, already anticipating that they are more energy efficient, it is necessary to look for ways to test this application. And one of the possible ways of doing it is through the use of a discrete simulation software, in which it is possible to simulate possible scenarios and verify the impact they generate regarding energy. Consequently, this research raises the hypothesis of how the use of discrete simulation can aid in the management of energy consumption in a new production line.

## 2.1 SIMULATION IN ENERGY EFFICIENCY

Simulation of discrete events can be defined as (Kouki et al. 2017):

The dynamic flow simulation or the discrete event simulation (DES) is a method for anticipating the evolution of complex systems where multiple factors make it difficult or even ineffective static and analytical approaches. This method enables creating a digital layout commonly used for manufacturing system design or operations including planning and scheduling operations, real-time control, operating policies and performance analysis.

In light of the company's concern with environmental impacts, some studies integrate modeling in energy flows with DES, aiming at improving the performance of manufacturing systems and sustainability. Environmental impacts, such as energy consumption, are parameters to be controlled, and for this, reliable tools are needed to control them (Kouki et al. 2017).

The means for modeling and simulating the total energy consumption within the system is part of the measurement of each machine. The energy profile of each of the machines must be analyzed so that this information is subsequently introduced into the simulation software. The energy load profile can be constant or variable, depending on the state of the machine (Kouki et al. 2017). On the other hand, Thiede et al. (2012) state that it is crucial to understand that the consumption of all forms of energy and resources are not static and that these vary according to the state of the machine (on, off, standby, etc.).

The machine consumption data that feed the simulations are usually acquired through measurement. However, in some cases, they can be acquired through empirical models or technical documents (Abele et al. 2015).

Weinert et al. (2011) introduced the concept of energy block, which is the state the machine is in production. It is represented by power level and duration so that the energy profile of the whole process can be reproduced by a succession of these blocks. Each type of equipment has several operating states that display different power consumption patterns that can be identified in your power profile. The operating states are, for example: off, on, heating, standby, processing, and stationary. Different consumption behaviors generate different process parameters. These, therefore, generate an energy consumption behavior that can be reproduced in a simulation (Weinert et al. 2011).

### **3. METHODOLOGY**

The simulation tool was defined as the methodology used to perform energy efficiency tests on a new line. The use of simulation for this purpose was used by some authors in the literature. Gomes (2015) brings together a list of authors who used the method, as well as, presents a model that shows how the simulation can be used to perform tests in an operant line, looking for ways to improve it.

"Simulation is the experimentation of a real system through models" (Bateman 2013). Simulation models are considered powerful and are used to analyze complex systems. It is considered the imitation of a process or system that exists in real life, and that happens over time. (Morabito Neto and Pureza 2012). To do this, it is necessary to generate a history of the artificial system and observe it to define the interferences in this system, so that it becomes more similar to the real case being represented (Banks 1999). In addition, simulation has the advantage of being a more simplified representation of reality, highlighting the most important aspects of the real system (Foren-Nyberg and Haramaki 1998).

The simulation model allows putting components of the system making them easier to understand the reality, allowing to perform experiments to predict the behavior of a real system (Bateman 2013).

The model defined in this paper will use two simulation software to perform the experiments, Plant Simulation and Witness 13, each of them allowing different simulation functions. On one hand Witness is the best software to perform flow analysis, because it is simpler and permits long-term simulations. On the other hand,

Plant Simulation is a sophisticated software, which allows short-term simulations and allows energy expenditure tests.

#### **4. MODEL PROPOSED**

The objective of this paper was to propose a model for the improvement of energy efficiency in a production line project. This line has not yet been implemented and, therefore, the experiments were carried out using simulation software.

To be in accordance with its aim, the proposed model used, as reference, models and frameworks proposed by various authors.

The models which the model proposed was based, were found through a systematic literature review, described in detail in Saldanha et al. (2016a), as well as in doctoral theses that used methods similar to those found in the present study.

From each of the models used as a reference, one or more characteristics were selected. The works that were used was by Larek et al. (2011), May et al. (2015), Vikhorev et al. (2013), Carvalho (2015) and Gomes (2015). The detailing of how the elaboration of the proposed model was carried out can be seen in Saldanha et al. (2016b).

The work developed by Larek et al. (2011) was the foundation for the structure of the model. Information about the states of the machines to be studied and the energy consumption of each state was withdrawn from May et al. (2015). Using indicators to conduct the energy efficiency study was the selected feature of the work of Vikhorev et al. (2013). From the work of Carvalho (2015), the proposed kWh/part indicator was used to evaluate the variations between the different scenarios of the experiments. Finally, the utilization of simulation to study energy efficiency was based in Gomes (2015).

Based on the characteristics established in these works, a model was proposed for the improvement of the energy efficiency in a new machining line.

The first step of the model comprised the construction of the study of the current state. This process began with the analysis of the current line. For this, it was necessary to collect data, essential for the assembly of the simulation of the line. It was then followed by the survey of parameters such as cycle times, machine breakdown and repair times, tools setup times, as well as other data that could help the simulation

model elaboration. To test the model, it was necessary to use software that would support the line flow data: Witness.

After the completion of these processes, it was necessary to verify if the simulation reflected a scenario close to reality so that the experiments performed in the line were considered accurate. Several adjustments were made until the simulation became a closer representation of the real line. When the simulation was considered valid, it was followed by the study of the future state.

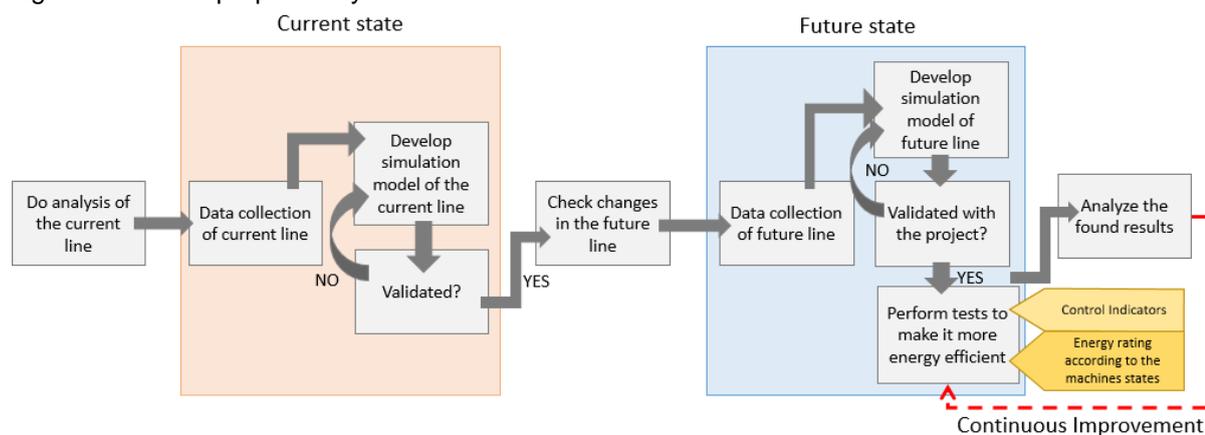
In the second stage, the study of the future state, the changes that the line would suffer were raised. Then, the data that would be used in this future line was collected. Since the line does not exist yet, it was necessary to use the data provided by the machine developers as parameter.

Based on these premises, it was possible to build the simulation of the future state of the line. As it had not been implemented yet, the simulation has involved also layout modifications, changes in the number of machines and the scheduling of the machines, which allowed possible alterations to be checked before its actual implementation.

After the simulation's validation, it was possible to carry out energy experiments. For this, the energy expenditures were verified, according to the machine states, and used one of the indicators established by Carvalho (2015) to analyze the impact of each of the changes in the line. For this second stage, a second simulation software was used, Plant Simulation, which was able to accept data and generate energy calculations.

The results were then analyzed to verify the impact of changes in energy consumption. And, in the last phase, the possibilities to improve the advances were verified, generating a continuous cycle of improvement tests and analysis of the results. The complete model can be seen in Figure 1, below:

Figure 1 – Model proposed by author



Source: Author, 2017.

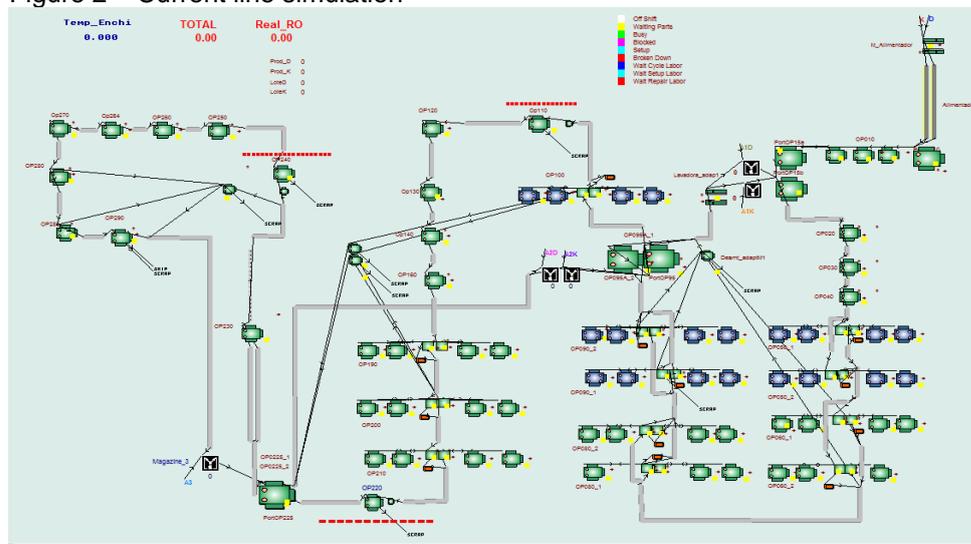
## 5. EXPERIMENT DESCRIPTION

To perform the experiment using the simulation software, the model created by the author was used.

For the first phase, comprising the modeling of the current state of the existing machining line, the following steps were followed.

The classic steps for the elaboration of a simulation were followed, tracking the data that impacts the line process flow: the parts' path, cycle times, conveyor sizes, data related to machine breakage and adjustments, scrap rates, quality analysis and labor. Figure 2 shows the simulation of the current line.

Figure 2 – Current line simulation



Source: Witness, 2016.

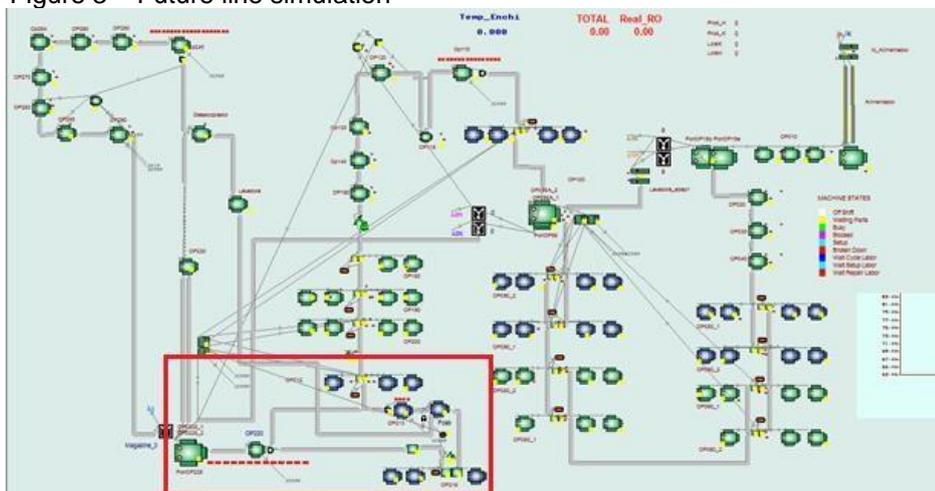
After the simulation was programmed, it was possible to generate analysis results, such as the rate of use of the machines, the identification of production bottlenecks, and, most importantly, if the line was operating according to the actual line, specified by the operational efficiency rate (OE).

With the calculation of OE, it was possible to observe if what had been modeled was compatible with reality, since this data was controlled by the engineering team frequently.

Once the simulation phase of the current line was elaborated, it was necessary to start the new line, which was based on the current line, however, with some changes in the flow, as well as a new area, with new machines.

Using the simulation of the current line, the modifications for the new line were made. The new line flow was established, and breaks, cycle time, and setup data was input as defined by the machine suppliers. Figure 3 shows the simulation with the line changes highlighted in red.

Figure 3 – Future line simulation



Source: Witness, 2016.

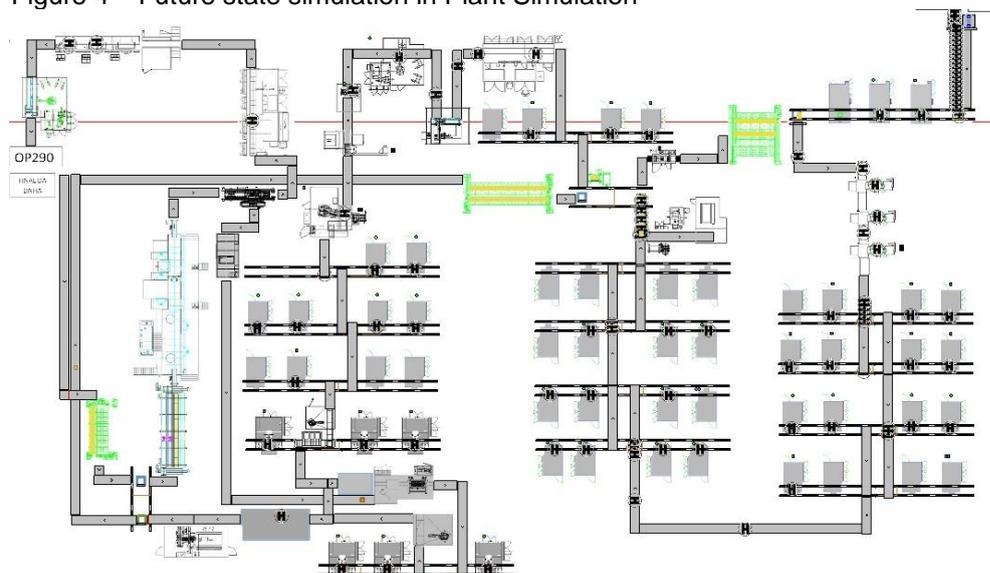
For this phase, the evaluation of the simulation was done in the same way as in the previous simulation, except for the fact that the OE of the comparison parameter was defined by the team of process engineers who were working on the line implementation.

After performing flow simulations using the software Witness, the next step consisted in performing energy tests on the new line. These tests carried out some modifications in the line and the measurement of how much these changes impacted on the energy consumption, because, it is understood that the mapping of these

impacts is a good resource to generate actions of energy saving, for example, in times of lower demand.

To perform the energy tests, it was necessary to use another simulation software, Plant simulation. The simulation was similar, except for the fact that it was possible to input energy data of several states of the machines and, therefore, to be able to map both the consumption of the machines individually and of the complete line (Figure 4).

Figure 4 – Future state simulation in Plant Simulation



Fonte: *Plant Simulation*, 2016.

Simulation experiments involved changes in the number of machines being used and changes in the mix of products being machined in the line. Their description is in the next section.

## 5.1 LAUNCHING OF THE EXPERIMENT

To measure the effect of energy changes in the line, the simulation parameters were altered and, subsequently, the impact generated in the results were verified.

Each of these experiments resulted in graphs of how the machines are used, how much each one was consuming and a table with the energy consumptions linked to each state of the machine. The results were generated by defined parameters of power for each state of the machine.

After verifying the results, one of the indicators defined by Carvalho (2015) was used to gauge the impact generated by each change.

Eight tests were performed, using the simulation software.

- a) 1<sup>st</sup> scenario – an experiment to measure the energy expenditure of the line with the mix of products A and B, with all the machines working reflecting the operation of the real line, to verify its operation and generate parameters of comparison;
- b) 2<sup>nd</sup> scenario – an experiment to simulate the production flow only with parts A circulating in the line;
- c) 3<sup>rd</sup> scenario – an experiment to simulate the production flow only with parts B circulating in the line;
- d) 4<sup>th</sup> scenario - between Operations 50 and 90, decrease the number of machines, keeping only six machines in operation;
- e) 5<sup>th</sup> scenario - an experiment similar to the 2<sup>nd</sup> scenario, with only parts A circulating in the line, however, with the machines that perform only part B operations turned off;
- f) 6<sup>th</sup> scenario – an experiment to simulate the decrease in the number of machining centers operating between OP 100 and 212;
- g) 7<sup>th</sup> scenario – an experiment to simulate the decrease of the number of machines in all operations that are machining centers;
- h) 8<sup>th</sup> scenario – an experiment to simulate the addition of a machine in operations 60 and 80.

These scenarios were proposed in order to anticipate different moments, when the demand for certain products can grow or decrease, generating the need to use a larger or smaller number of machines in the operations. In addition, these experiments aimed to show the variations in energy consumption in the various scenarios, to serve as a guideline for future improvement actions towards energy management policies.

The details of how the experiment was performed will be exemplified in scenario 1. Of the other experiments, only the results will be presented.

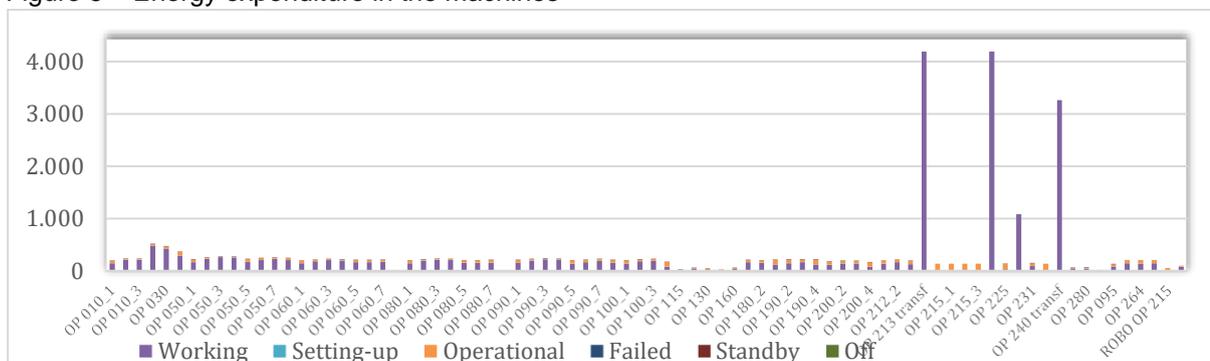
### **5.1.1 Scenario number 1**

The first scenario reflects an experiment to measure the energy expenditure of the line with the mix of products A and B, with all the machines working and,

consequently, reproducing the operation of the real line. This scenario produces 67 pieces per hour.

Figure 5 shows the distribution of energy use, evidencing how much energy each operation spends, according to the state in which the machine is. The graph shows energy consumption peaks in machines such as washing machines, which are characterized by being transfer - in charge of transfer operations - which, by definition, do not stop working even in the absence of parts, differing from a machining center, for example, which remains operating when there are no parts. Another fact verified was that many machines continued to consume energy even though they were operational (connected, but not working a part).

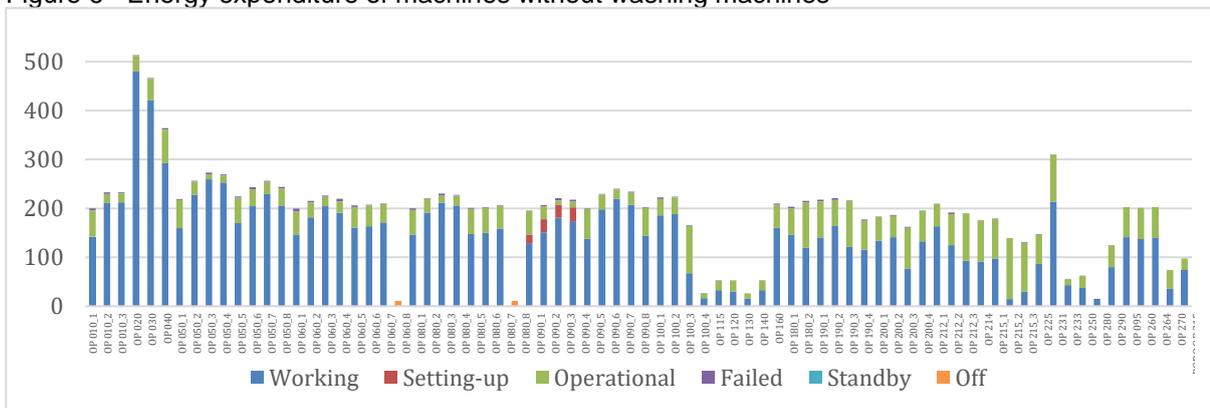
Figure 5 – Energy expenditure in the machines



Source: author, 2017

In order to improve the graph's analysis, and to better visualize the energy consumption in the line, the data on the consumption of washing machines was withdrawn. Taking into account that they are outliers within the graph their withdrawal facilitates the understanding of the consumption of the other machines (Figure 6):

Figure 6 - Energy expenditure of machines without washing machines



Source: author, 2017

By analyzing the machines except the washing machines, according to Figure 6, it was possible to identify that the machines that consume more energy are the ones from the OP 20 to 40, and the operation 230. In addition, it was evident that the last machine of the operations OP 215 and OP 225 were idle.

The total line consumption during the period established for the simulation was 31576.89 kWh, 3315.44 kWh out of the total were identified in machines only in an operational state, that is, without working on parts.

The next step was to carry out the analysis of this state according to the indicator established by Carvalho (2015). The indicator used as a means to compare the scenarios was the total energy consumption in the line per piece produced.

$$\text{kWh per piece produced} = \text{Total kWh consumed in the line} \div \text{pieces produced}$$

In the simulation, during the measurement period - 24 hours - the total number of pieces produced was 1608 pieces (67 pieces per hour).

Using the above equation, the calculation was 19.64 kWh / piece:

$$\frac{31576,89 \text{ kWh}}{1608 \text{ pieces}} = 19,64 \text{ kWh/piece}$$

The calculation of the indicator was used as a comparison parameter between all scenarios.

## 6. ANALYSIS OF RESULTS

Based on the results obtained in the experiments, it was possible to make a comparison between the first scenario and the others. The first scenario was used as a parameter because it is the one that reproduces the actual operation in the company.

For this, a table was built to compare the total energy consumption in each scenario; how much of that energy is operational, which means that is spent with machines turned on, but in the waiting state; the defined indicator, which compares how much is needed to produce each piece with the production of pieces in each simulated period - 24 hours (Table 1).

Table 1 - Total energy consumption per scenario

<b>Scenario</b>	<b>Total energy</b>	<b>Operational Energy</b>	<b>Energy per piece</b>	<b>Parts produced</b>
<b>Scenario 1 (parameter)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/piece	1608
<b>Scenario 2</b>	31.232,97 kWh	3.591,82 kWh	19,14 kWh/ piece	1632
<b>Scenario 3</b>	31.961,17 kWh	3.190,00 kWh	19,58 kWh/ piece	1632
<b>Scenario 4</b>	30.027,91 kWh	3.456,55 kWh	22,75 kWh/ piece	1320
<b>Scenario 5</b>	26.305,13 kWh	2.871,76 kWh	16,12 kWh/ piece	1632
<b>Scenario 6</b>	30.877,87 kWh	2.646,13 kWh	20,10 kWh/ piece	1536
<b>Scenario 7</b>	29.931,70 kWh	2.617,65 kWh	25,45 kWh/ piece	1176
<b>Scenario 8</b>	31.815,69 kWh	3.581,04 kWh	20,09 kWh/ piece	1584

Source: Author, 2017.

To verify how the proposed changes affect energy consumption, the seven scenarios were compared with the parameters of the first scenario, scenario 1.

With the established comparisons, it was possible to estimate the economy or the increase in energy expenditures and the resulting financial impact for the company if one of these scenarios was adopted.

## 6.2 PARAMETER SCENARIO X OTHER SCENARIOS

The comparison between the first scenario and the other scenarios can be seen in Table 2.

Table 2 - Scenario 1 X Scenarios

<b>Scenario</b>	<b>Total energy</b>	<b>Operational Energy</b>	<b>Energy per piece</b>	<b>Parts produced</b>
<b>Scenario 1 (parameter)</b>	31.576,89 kWh	3.315,44 kWh	19,64 kWh/piece	1608
<b>Scenario 2</b>	- 343,92 kWh	+276,38 kWh	- 0,5 kWh/ piece	+ 24
<b>Scenario 3</b>	+ 384,28 kWh	- 125,44 kWh	- 0,06 kWh/ piece	+ 24
<b>Scenario 4</b>	- 1548,98 kWh	+ 141,11 kWh	+ 3,11 kWh/ piece	- 288
<b>Scenario 5</b>	- 5271,76 kWh	- 443,68 kWh	- 3,52 kWh/ piece	+ 24
<b>Scenario 6</b>	- 699,02 kWh	- 699,31 kWh	+ 0,46 kWh/ piece	- 72
<b>Scenario 7</b>	- 1645,19 kWh	- 697,79 kWh	+ 5,81 kWh/ piece	- 432

**Scenario 8** | + 238,80 kWh    + 265,60 kWh    + 0,45 kWh/ piece    - 24

Source: Author, 2017.

In comparison with scenario 2, there is evidence that when production is exclusive of parts A, the amount of energy consumed drops 343.92 kWh per day. However, although the consumption is lower, the expenditure on the machines operating in the waiting state increases by 276.38 kWh. This increase in consumption is mainly because the machines in the circuit dedicated to part B are in standby mode the whole time, without producing and without suffering variations in energy expenditure.

In scenario 3, only parts B are circulating in the line, and there is an increase in energy expenditure of 384.28 kWh per day. This is due to the more intensive use of the machines in the particular circuit of part B. Because there are fewer machines in standby on this same circuit, the amount spent on operational energy drops to 125.44 kWh.

When scenario 4 is compared with the parameter scenario, there is an improvement of total energy expended. The scenario generates an economy of 1548.98 kWh. However, the consumption in standby machines increase is of 141.11 kWh.

The fourth comparison was between the parameter scenario and scenario 5, which, like scenario 2, consists of limiting production to product A, with the difference of keeping machines used exclusively for product B turned off. This scenario is the one with the greatest change in all measurements, with a reduction of 5271.76 kWh in total energy consumption and a decrease of 443.68 kWh in the use of energy in standby machines.

The comparison with scenario 6 shows a subtle drop in energy consumption of only 699.02 kWh. When the fall in the use of operational energy is observed, its value is 699.31 kWh, very close to the value of the total energy consumption difference between the two scenarios. This was because of the energy savings due to the shutdown of some machines. However, this shutdown made the other machines run more in production and spent less time in standby mode.

Scenario 7 could only be put into practice in the case of extremely low demand. In this scenario, the machines are switched off in two different areas of the line and the production of parts decreases by 432 pieces, which corresponds to a decrease of

approximately 27% in production. There is a decrease in energy consumption of 1645.19 kWh and an operational energy consume drop of 697.79 kWh.

The last comparison generated by the simulation was between the parameter scenario and scenario 8. In this case, the expected result was that the increase in the number of machines in two operations would reflect an increase in production. However, what happened was the opposite, resulting in a reduction of 24 pieces produced in the total time of the simulation, that is, in 24 hours. The results show that the addition of new machines does not change productivity. Consequently, investment in increasing the number of machines becomes inadvisable. In addition, there is an increase in total energy consumption of 238.8 kWh and operating energy of 265.6 kWh, because there are two new machines operating in the line.

According to data from COPEL (2016), the energy company from Parana, the cost of 1 kWh for the industries is R\$ 0.64543. It can then be calculated how much the energetic variation impacts in the period of one day (period established for the simulation) and in the long term (period of one year of work).

The established calculation is the cost of one kWh X the amount of kWh spent or saved. For the calculation of one year, 5 working days per week were established, and 47 worked weeks per year.

The financial calculation is consolidated in Table 3.

Table 3– Financial difference

<b>Scenario</b>	<b>Daily \$ difference</b>	<b>Annual \$ difference</b>
<b>Scenario 2</b>	- R\$ 221,98	- R\$ 52.165,30
<b>Scenario 3</b>	+ R\$ 248,03	+ R\$ 58.287,05
<b>Scenario 4</b>	- R\$ 999,76	- R\$ 234.943,60
<b>Scenario 5</b>	- R\$ 3.402,55	- R\$ 799.599,25
<b>Scenario 6</b>	- R\$ 451,17	- R\$ 106.024,95
<b>Scenario 7</b>	- R\$ 1061,85	- R\$ 249.535,75
<b>Scenario 8</b>	+ R\$ 154,13	+ R\$ 36.220,55

Source: Author, 2017.

## 6.2 ANALYSIS' SYNTHESIS

From the comparative analyses between the parameter scenario and the other scenarios, it was possible to verify what are the best actions to be taken on the line, according to the different situations that may happen (Table 4).

Table 4 – Best scenario for each situation

<b>If the demand for type A pieces is bigger</b>	In the case of a higher demand for part A, the best choice is for scenario 5, since in this case, in addition to circulating only this type of part in the line, the circuit that only circulates part B is turned off, generating good energy saving.
<b>If the demand for type B pieces is bigger</b>	In this case, it is still better to maintain the line by performing a production mix, rather than exclusively producing part B. By performing a mix with more parts B than parts A, a balance of energy spending occurs.
<b>If the demand is lower</b>	In the case of a lower demand in line, the analyses were made in scenarios 4, 6 and 7. Each of them with different degrees of impact on the production, and proportionally, in the energy expenditure. It is up to the production planner to check how much demand is in order to choose between machine shutdown settings.
<b>If the demand is bigger</b>	The scenario verified for the case of higher demand was the scenario 8, but, as it can be seen, the increase in the number of machines did not increase production. Therefore, if there is a demand for an unexpected increase in production, the company should check other alternatives, such as opening an extra shift or running the line at weekends.

Source: Author, 2017.

## 7. CONCLUSION

The research in this article verified that it is possible to use the simulation as an auxiliary resource in the energy management of a production line. In order to come at this result, an extensive bibliographical research was carried out in several sources, seeking, first, the models that were proposed in the literature about the improvement of energy efficiency in production lines.

It was noticed that the use of simulation as a resource for energy management is not widely used and, therefore, it was established as the theme of this research the use of simulation as a tool to manage energy use of a line.

Next, a model of the application of energy management in the production line was proposed, using simulation, with the differential that this model was intended to help the implementation of this management in production lines still in planning stage.

A simulation of the current line was performed, refining it to the point that it mirrored the actual line as accurately as possible. Once this goal was achieved, it was possible to gradually change it to create the simulation of the future line.

When the simulation of the future line reflected the flow functioning properly, it was possible to study the energy consumption of it and then generate possible scenarios to be implemented. This will allow action plans to manage energy to be already planned ahead of time.

Finally, it was possible to verify that the use of simulation to meet the energy management of a line, even though this line has not yet been implemented, is a valid resource.

The paper has hypothesized how the use of discrete simulation can aid in the management of energy consumption in a new production line. In the case presented in the research, the simulation assisted by creating a sufficiently real simulation capable of managing the consumption of this line, making possible the creation of scenarios that reflect how the line's energy behavior will be and, consequently, enabling the elaboration of action plans, in case it is necessary.

This work has presented a model proposal that allows managing the energy expenditures of a new line of production, using simulation software that allows the reading of energy data. Using the results collected by these simulations, it was possible to predict the behavior of the line about energy expenditures.

## 7.1 RESEARCH LIMITATIONS AND FUTURE WORK

This work has some limitations, such as the fact that the simulation was performed in only one production line, in a single company. The performance of the study in another line could generate more results, which would allow comparisons to be made.

In addition, this work was applied to a line that is not yet in operation. Although the data used in today's machines is true, the new machines that will be deployed on the line use the data obtained from the supplier. This can generate some variation once

the line is installed and the data collections can later point out some errors in the parameters used in this study.

As a future work, the author suggests an expansion of this research, through the replication of this study in other kinds of company, with other types of product, to verify its applicability in other scenarios.

## REFERENCES

- Abele, E., Braun, S., Schraml, P. (2015). Holistic simulation environment for energy consumption prediction of machine tools. *Procedia CIRP*. 29, 251-256.
- Banks, J. et al. (2001). *Discrete-event system simulation*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 594 p.
- Bateman, R.E. (2013) *Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura*. Rio de Janeiro: Elsevier, 161 p.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, Frank O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*. 19, 667-679.
- Carvalho, H.M.B (2015). Metodologia de Avaliação e Aumento da Eficiência Energética em Manufatura de Elementos Discretos: Aplicação em Usinagem, *Doctoral Thesis on Aerospace Systems and Mechatronics - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)*, São José dos Campos.
- Christoffersen, L.B., Larsen, A., Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish industry. *Journal of Cleaner Production*. 14, 516-526.
- COPEL. (2016) *Tarifa Convencional - subgrupo B3*.  
<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F8c04fbf11f00cc5703257488005939be>. Accessed February 2nd 2017.
- Forssén-Nyberg, M., Hakamäki, J. (1998). Development of the production using participative simulation games: Two case studies. *International Journal Production Economics*. 56. 169-178.
- Gomes, V.E.O. (2015). Método para o aumento de eficiência energética em sistemas de manufatura discreta em nível e produção. *Doctoral Thesis on Aerospace Systems and Mechatronics - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)*, São José dos Campos.
- Gordic, D., Babic, M., Jovicic, N., Šušteršič, V., Koncalovic, D., Jelic, D. (2010). Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management*. 51, 2783–2790.
- Jaffe, A.B., Stavins, R.N. (1994). The energy-efficiency gap – What does it mean?. *Energy Policy*, 22(10), 804-810.
- Kannan, R., Boie, W. (2003). Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management*, 44, 945–959.
- Kouki, M., Cardin, O., Castagna, P., Cornardeau, C. (2017). Input data management for energy related discrete event simulation modeling. *Journal of Cleaner Production*. 141, 194-207.
- Larek, R., Brinksmeier, E., Meyer, D., Pawletta, T., Hagendorf, O. (2011). A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. *Production Engineering*. 5(5), 575-579.

- May, G., Stahl, B., Taisch, M., Prabhu, V. (2015). Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*. 50(23), 7071-7089.
- Mills, E., Shamshoian, G., Blazek, M., Naughton, P., Seese, R. S., Tschudi, W., Sartor, D. (2008). The business case for energy management in high-tech industries. *Energy Efficiency* 1(1), 5-20.
- Morabito Neto, R.; Pureza, V. (2012). Modelagem e Simulação. In: Paulo Augusto Cauchick Miguel (Org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier. ABEPRO.
- Mukherjee, K. (2008). Energy use efficiency in U.S. manufacturing: A nonparametric analysis. *Energy Economics*. 30, 76–96.
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? - Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377-390.
- Saldanha, G.C., Gouvea Da Costa, S.E.; Pinheiro De Lima, E. (2016). Energy Efficiency Frameworks: A Literature Overview. In: *POMS 27th Annual Conference*, 2016, Orlando, Florida. POMS 27th Annual Conference Proceedings, 2016.
- Saldanha, G.C., Mano, A.P, Gouvea Da Costa, S.E.; Pinheiro De Lima, E. (2016). Energy efficiency framework on machining processes: a proposed model. In: *International Conference on Production Research Americas*, 2016, Valparaíso, Chile. The 8th International Conference on Production Research Americas, 2016.
- Tanaka, K. (2008). Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy*. 36, 2887-2902.
- Thiede, S., Seow, Y., Andersson, J., Johansson, B. (2013). Environmental aspects in manufacturing system modeling and simulation: State of the art and research perspectives. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 6(1), 78-87.
- Vikhorev, K., Greenough, R., Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production*. 43, 103-112.
- Weinert, N., Chiotellis, S., Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 60(1), 41-44.
- Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J. (2009). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*. 2, 109-123.
- Worrell, E., Price, L. (2011). Policy scenarios for energy efficiency improvement in industry. *Energy Policy*. 29(14), 1223-1241.



Figura 8 - Simulação da linha futura

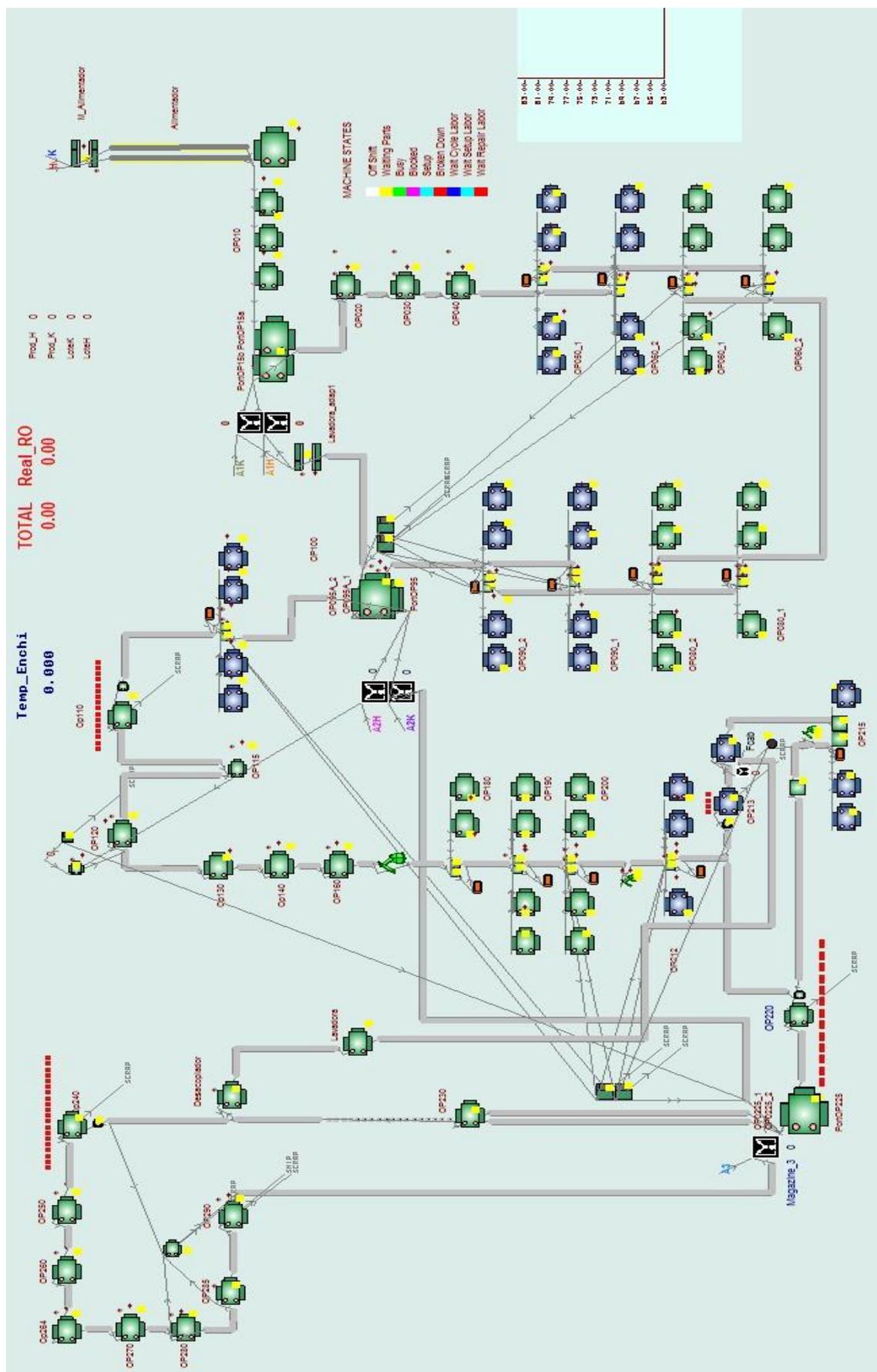
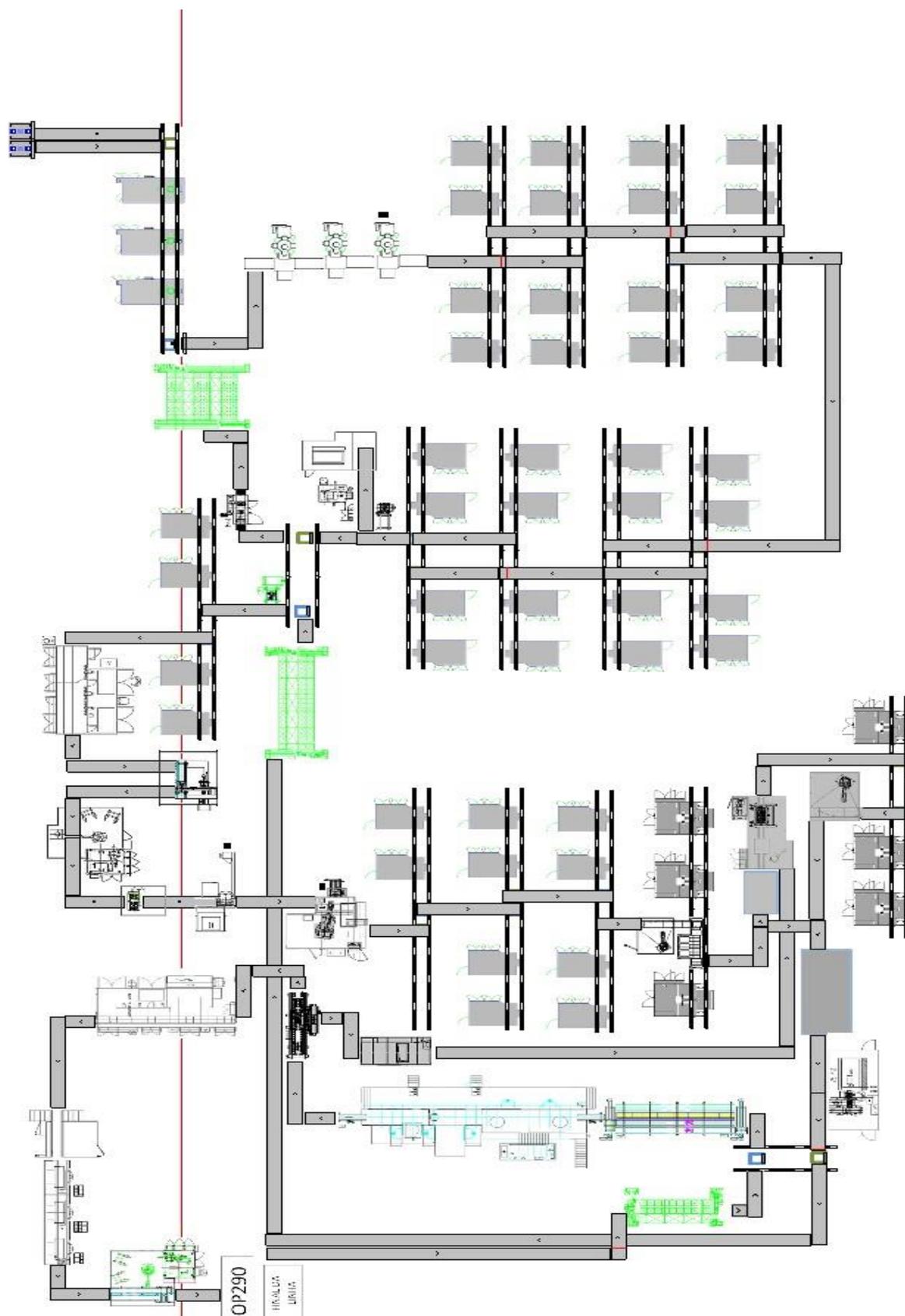


Figura 10 - Simulação da linha futura no Plant Simulation



## APÊNDICE F – PLANILHA DE PARÂMETROS

Operação	Quantidade de máquinas	MTBF (min)	MTTR (min)	Disponibilidade (%)	Tempo de ciclo (min)	Tempo de Setup (min:seg)	Taxa de Refugo	Energy Working (kW)	Energy Setting-up (kW)	Energy Operational (kW)	Energy Failed (kW)	Energy Standby (kW)	Energy Off (kW)	Setup after parts
Esteiras		04:00:00	00:12:00	0.998003992	00:00:06	00:00:00		2,9	1	1	1	1	0,4	0
OP 005	1					00:00:00		2	2	2	2	2	0,4	0
Portal OP10	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:12	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 010	3	05:18:36	00:08:43	0.973359404	00:02:02	00:00:00	0.003473	9,5	5	5	5	5	0,4	255
Portal OP 015	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:42	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 020	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:41	00:00:00	0.005643	24,1	5	5	5	5	0,4	1200
OP 030	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:36	00:00:00		24,1	5	5	5	5	0,4	1800
OP 040	1	04:40:12	00:06:20	0.977873944	00:00:25	00:00:00		24,1	5	5	5	5	0,4	1800
Portal 050	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 050	8	03:28:12	00:05:27	0.97449099	00:05:27	00:00:00	0.014758	10,9	5	5	5	5	0,4	80
Portal 060	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 060	8	03:06:36	00:04:59	0.974005637	00:04:42	00:00:00	0.026478	9,2	5	5	5	5	0,4	324
Portal 080	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 080	8	03:34:12	00:05:35	0.974610975	00:04:47	00:00:00	0.024742	9,3	5	5	5	5	0,4	361
Portal 090	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 090	8	03:19:48	00:05:16	0.974301458	00:05:25	00:00:00	0.071622	9,8	5	5	5	5	0,4	200
OP 095	1	19:16:00	00:03:00	0.997411562	00:00:42	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
Portal OP 095	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:39	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
Portal OP 100	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 100	4	03:37:12	00:05:40	0.97460289	00:02:29	00:00:00	0.002604	9,7	5	5	5	5	0,4	400
OP 110	1	10:00:00	02:00:00	0.992063492	00:00:39	00:00:00		158,2	5	5	5	5	0,4	1000
OP 115	1	03:37:12	00:05:40	0.992063492	00:00:42	00:00:00		1	1	1	1	1	0,4	0
OP 120	1	11:13:00	00:08:36	0.987382629	00:00:41	00:00:00		2	2	2	2	2	0,4	0
OP 130	1	08:00:00	01:00:00	0.999875016	00:00:38	00:00:00		2	2	2	2	2	0,4	0
OP 140	1	08:00:00	01:00:00	0.999875016	00:00:38	00:00:00	0.004775	1	1	1	1	1	0,4	0
OP 160	1	23:13:00	00:15:00	0.997381285	00:00:41	00:00:00		2	2	2	2	2	0,4	0
Robô 180	1	23:13:00	00:15:00	0.997381285	00:00:42	00:00:00		5	2	2	2	2	0,4	100
Portal OP 180	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 180	2	03:28:12	00:05:27	0.97449099	00:01:19	00:00:00	0.029083	9,7	5	5	5	5	0,4	200
Portal OP 190	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
OP 190	4	03:57:00	00:06:06	0.974907445	00:02:40	00:00:00	0.003473	8,8	5	5	5	5	0,4	1062
Portal OP 200	1	20:13:12	00:04:52	0.998171599	00:00:23	00:00:00		4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	0,4	1000
Robô 200	1	23:13:00	00:15:00	0.997381285	00:00:42	00:00:00		5	2	2	2	2	0,4	100
OP 200	4	03:48:00	00:05:55	0.974733872	00:02:30	00:00:00	0.086815	8,1	5	5	5	5	0,4	125

