CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RODRIGO LUIZ ANTONIOL

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO POR
MEIO DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE MANUFATURA DIGITAL**

São Bernardo do Campo

2016

RODRIGO LUIZ ANTONIOL

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO POR
MEIO DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE MANUFATURA DIGITAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Centro Universitário FEI para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientado pelo Prof. Dr. Fábio Lima.

São Bernardo do Campo

2016

Antoniol, Rodrigo Luiz.

Análise de eficiência energética em sistemas de produção por meio da utilização de ferramentas de manufatura digital / Rodrigo Luiz Antoniol. São Bernardo do Campo, 2016.

131 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lima.

1. Eficiência Energética. 2. Manufatura Digital. 3. Simulação. I. Lima, Fábio, orient. II. Título.

Aluno: Rodrigo Luiz Antoniol

Matrícula: 214128-1

Título do Trabalho: Análise de eficiência energética em sistemas de produção por meio da utilização de ferramentas de manufatura digital

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lima

Data da realização da defesa: 17/03/2016

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 17 / 03 / 2016.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Lima

Ass.: _____

Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Ass.: _____

Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais,
que sempre me impulsionam em direção às
vitórias dos meus desafios.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre me conceder sabedoria na escolha dos melhores caminhos, coragem para acreditar, força para persistir e proteção para me amparar.

Aos meus pais, Neide e José Luiz, pelo amor incondicional, apoio, confiança, motivação e educação que me proporcionaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Lima, por acreditar em meu trabalho desde o ingresso no programa de Mestrado, ofertando sempre total dedicação, disponibilidade, apoio, estímulo e colaboração para a concretização deste projeto. Mais que um orientador, um amigo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote, por me introduzir ao universo da simulação computacional na área de produção e compartilhar todo o seu vasto conhecimento e experiência através de preciosas contribuições durante a execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fabrizio Leonardi, pelos comentários e valiosas contribuições realizadas a este trabalho durante a etapa de qualificação.

Aos professores que ministraram a parte curricular deste Mestrado, cujos ensinamentos me permitiram conduzir este trabalho e obter experiências muito significativas.

Aos amigos e colaboradores do Centro Universitário FEI, pela convivência e troca de experiências.

“Com o coração se pede. Com o coração se procura. Com o coração se bate e é com o coração que a porta se abre. ”

Santo Agostinho, apud Castro (2014)

RESUMO

Recentes dificuldades de abastecimento do sistema energético brasileiro, mudanças climáticas globais, pressão pela aplicação de práticas sustentáveis e custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica com perspectiva de crescimento são fatores cada vez mais presentes na pauta de discussão da sociedade atual. De maneira complementar, o custo da energia elétrica torna-se cada vez mais significativo, sendo um importante vetor a ser considerado na competitividade empresarial. Desta forma, este trabalho busca incluir as variáveis associadas à eficiência energética dentro do contexto de análise de sistemas de manufatura. A metodologia utilizada inclui a construção de um modelo de simulação a partir de um sistema de manufatura digital, considerando-se esta uma tecnologia emergente que busca aprimorar os processos de desenvolvimento de sistemas de produção através da introdução de novos conjuntos integrados de software. Os cenários avaliados envolvem a coleta e análise de dados energéticos e de manufatura de uma linha de produção de motores automotivos, submetida à implementação de diferentes estratégias de simulação que objetivam a redução do consumo global de energia elétrica. Os resultados obtidos demonstram que a simulação de ações de controle a partir de sistemas de manufatura digital permite não apenas a obtenção de um diagnóstico apurado da situação atual das instalações, como também possibilita o uso mais eficiente dos recursos disponíveis através da identificação de oportunidades de incremento em indicadores de eficiência energética, mesmo em sistemas de produção já bem concebidos originalmente.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Manufatura Digital. Simulação.

ABSTRACT

Brazilian energy system's supply problems, global warming, outside pressures to the application of sustainable practices and rising energy prices are factors increasingly present in today's society. In addition, the cost of electric power becomes increasingly significant, being an important vector to be considered in business competitiveness. Thus, this work includes the energy efficiency variables within the context of manufacturing systems analysis. The methodology includes the development of a simulation model over a digital manufacturing system, an emerging technology that seeks to improve the industrial plants' development processes by introducing new integrated software suites. The evaluated scenarios involve the collection and analysis of energy and manufacturing data of an automotive engine production line, where different simulation strategies were implemented aiming the overall electricity consumption reduction. The results show that the simulation of control actions through digital manufacturing systems allows not only getting a current situation diagnosis of the facilities, but also enables a more efficient use of available resources by identifying opportunities to increase energy efficiency indicators, even in well designed production systems.

Keywords: Energy Efficiency. Digital Manufacturing. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de um modelo de simulação computacional.....	18
Quadro 1 – Metodologias de eficiência aplicáveis aos diferentes níveis dos sistemas de produção	22
Quadro 2 – Estados de energia	31
Quadro 3 – Estados de manufatura.....	31
Figura 2 – Relações estabelecidas entre estados de manufatura e estados de energia	32
Figura 3 – Diagrama de energia	33
Quadro 4 – Fatores de análise de energia elétrica	35
Quadro 5 – Resumo das composições tarifárias	40
Figura 4 – Sistema de bandeiras tarifárias.....	41
Figura 5 – Tarifa industrial média de energia elétrica no Brasil	42
Figura 6 – Carga tributária na cadeia do setor elétrico em 2006.....	42
Figura 7 – Comparação do custo da energia elétrica entre países selecionados.....	43
Figura 8 – Consumo de energia elétrica por setor no Brasil	44
Figura 9 – Dez maiores consumidores industriais de energia elétrica	44
Figura 10 – Autoprodução de energia elétrica industrial por setor	45
Figura 11 – Evolução das ferramentas de simulação	52
Figura 12 – Paradigmas de simulação de energia elétrica em sistemas de manufatura	56
Figura 13 – Segmento de linha considerado para estudo	60
Quadro 6 – Estados de energia da linha analisada.....	62
Figura 14 – Diagrama de estados de energia.....	62
Figura 15 – Interface do software <i>Plant Simulation</i> [®]	65
Figura 16 – Janela de configuração dos parâmetros de energia	66
Figura 17 – Visualização dos dados de energia elétrica do software <i>Plant Simulation</i> [®]	67
Quadro 7 – Correspondência entre estados de energia.....	67
Figura 18 – Modelo de simulação de linha de produção	73
Figura 19 – Alocação dos <i>buffers</i> de acordo com tempo de produção no cenário 1	75
Figura 20 - Alocação dos <i>buffers</i> sem restrição de capacidade no cenário 1	76
Figura 21 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 1	77
Figura 22 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 1.....	79
Figura 23 – Estratégia de balanceamento de conteúdo dos <i>buffers</i>	80
Figura 24 – Alocação dos <i>buffers</i> de acordo com tempo de produção para o cenário 2	83

Figura 25 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 2	83
Figura 26 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 2.....	86
Figura 27 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 3	89
Figura 28 – Comparativo de consumo de energia elétrica entre cenários	91
Figura 29 – Comparativo de consumo energético por unidade produzida	92
Figura 30 – Comparativo de índices do <i>Lean Energy Indicator</i> para os cenários propostos...	93
Figura 31 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 3.....	95
Figura 32 – Ocupação do <i>buffer</i> 1 em cenário com paradas não planejadas.....	97
Figura 33 – Ocupação do <i>buffer</i> 2 em cenário com paradas não planejadas.....	98
Figura 34 – Ocupação do <i>buffer</i> 3 em cenário com paradas não planejadas.....	98
Figura 35 – Ocupação do <i>buffer</i> 4 em cenário com paradas não planejadas.....	98
Figura 36 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 4	99
Figura 37 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 4.....	101
Figura 38 – Estratégia de controle de energia elétrica.....	102
Figura 39 – Estratégia de controle de energia a partir do conteúdo dos <i>buffers</i>	103
Figura 40 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 5	105
Figura 41 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 5.....	108
Figura 42 – Alteração de <i>layout</i> proposta.....	110
Figura 43 – <i>Layout</i> proposto para redução do consumo de energia elétrica	110
Figura 44 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 6	113
Figura 45 – Comparativo de consumo de energia elétrica entre cenários	115
Figura 46 – Comparativo de consumo energético por unidade produzida	116
Figura 47 – Comparativo de índices do <i>Lean Energy Indicator</i> para os cenários propostos.	117
Figura 48 – Redução de consumo X Produção anual.....	118
Figura 49 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 6.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de produção.....	61
Tabela 2 – Parâmetros de energia elétrica dos equipamentos da linha	63
Tabela 3 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 1	74
Tabela 4 – Alocação final de <i>buffers</i> e máquinas no cenário 1	75
Tabela 5 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 1	77
Tabela 6 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de <i>buffers</i>	81
Tabela 7 – Alocação de <i>buffers</i> e máquinas para cenário com gerenciamento de <i>buffers</i>	82
Tabela 8 – Dados obtidos de energia para o cenário 2	84
Tabela 9 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de <i>buffers</i> e inicialização em <i>standby</i>	87
Tabela 10 – Alocação final de <i>buffers</i> e máquinas para cenário 3	89
Tabela 11 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 3 (1).....	90
Tabela 12 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 3 (2).....	90
Tabela 13 – Comparativo do custo energético anual para consumo de energia elétrica	94
Tabela 14 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 4.....	96
Tabela 15 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 4	99
Tabela 16 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de energia.....	103
Tabela 17 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 5	106
Tabela 18 – Comparativo do custo energético anual entre cenários 4 e 5.....	108
Tabela 19 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 6 (1).....	111
Tabela 20 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 6 (2).....	111
Tabela 21 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 6 (1).....	113
Tabela 22 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 6 (2).....	114
Tabela 23 – Comparativo do custo energético anual entre cenários	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BRIC	Agrupamento econômico composto por Brasil, Rússia, Índia e China.
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DES	Simulação de Eventos Discretos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIRJAN	Federação das Indústrias do Rio de Janeiro
GWh	Gigawatt-hora
ICMS	Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ISO	Organização Internacional para Padronização
KPI	Indicador-chave de Desempenho
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawatt-hora
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTR	Tempo médio de reparo
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIS	Programa de Integração Social
PLM	Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto
TI	Tecnologia da Informação
TWh	Terawatt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	RELEVÂNCIA	16
1.5	METODOLOGIA	17
1.6	PUBLICAÇÕES	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM ATIVIDADES DE MANUFATURA	21
2.2	INICIATIVAS DE PESQUISA VOLTADAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MANUFATURA	25
2.3	INDICADORES DE DESEMPENHO – KPIS	28
2.4	CONSUMO E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	36
2.5	BARREIRAS PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	37
2.6	O CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	38
2.7	A INDÚSTRIA NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO	43
2.8	SIMULAÇÃO E A APLICAÇÃO EMERGENTE DE SISTEMAS DE MANUFATURA DIGITAL	46
2.8.1	Definição de modelo	47
2.8.2	Simulação computacional	48
2.8.3	Ferramentas de simulação	50
2.8.4	Sistemas de manufatura digital	52
2.8.5	Aplicação de simulação em iniciativas de eficiência energética	55
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ABORDADO E PROCEDIMENTOS DO ESTUDO	59
3.1	SELEÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO A SER ANALISADO	59
3.2	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	63
3.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO E PREMISSAS ADOTADAS	68
3.4	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	70
3.5	CENÁRIOS PROPOSTOS	70
4	IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	73
4.1	LINHA SEM OCORRÊNCIA DE FALHAS	73
4.1.1	Produção máxima sem ações de controle de energia	74

4.1.2	Produção máxima com ações de controle dos <i>buffers</i>	80
4.1.3	Produção máxima com ações de controle dos <i>buffers</i> e inicialização em modo de <i>standby</i>	87
4.2	LINHA COM OCORRÊNCIA DE FALHAS ALEATÓRIAS.....	96
4.2.1	Produção máxima sem ações de controle de energia.....	96
4.2.2	Produção máxima com ações de controle de energia	102
4.2.3	Produção máxima com ações de controle de energia e alterações no <i>layout</i> da linha por meio da inclusão de <i>buffers</i> unitários	109
5	CONCLUSÕES.....	121
	REFERÊNCIAS	124

1 INTRODUÇÃO

Recentes dificuldades de abastecimento do sistema energético brasileiro, mudanças climáticas globais, pressão pela aplicação de práticas sustentáveis e custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica com perspectiva de crescimento são fatores cada vez mais presentes na pauta de discussão da sociedade atual.

De acordo com dados do Balanço Energético Anual (EPE, 2013), o setor industrial é o maior consumidor unitário de energia elétrica do mercado brasileiro, sendo responsável por 42,1% de todo o consumo nacional. Diante deste cenário de recursos naturais escassos e alta demanda, diversos estudos apontam que há um potencial significativo de melhoria dos indicadores de eficiência energética na indústria de manufatura, com possibilidade de incrementos de até 30% apenas aplicando-se tecnologias já existentes (HERRMANN et al., 2011).

Conforme apresentado por Bunse et al. (2011), há três fatores preponderantes para a introdução de melhorias de eficiência energética pela indústria: o aumento da competitividade, através da redução do consumo de energia elétrica; o atendimento às novas regulamentações ambientais e certificações, como a ISO 50001; e o estabelecimento de uma imagem positiva junto aos clientes, relacionada à aplicação de práticas sustentáveis no processo produtivo. No entanto, correlacionar o uso de energia elétrica com as operações realizadas em sistemas de manufatura representa um desafio, devido à complexidade dos sistemas de produção e do grande número de fontes de dados (VIJAYARAGHAVAN; DORNFELD, 2010). Neste caso, cálculos estatísticos, redes neurais artificiais, lógica fuzzy e simulação de sistemas são quatro abordagens alternativas que podem ser aplicadas para análise de consumo de instalações industriais, sendo que a simulação tem se mostrado uma abordagem significativa para este tipo de aplicação (HERRMANN et al., 2011).

Apesar da existência de estudos anteriores que utilizaram o método de simulação de eventos discretos para análise de eficiência energética em equipamentos isolados, como Solding e Thollander (2006), Solding e Petku (2005) e Ghani, Monfared e Harrison (2012), verifica-se que a análise avulsa de equipamentos é efetuada com frequência, enquanto o diagnóstico da eficiência energética global dos sistemas de produção ainda é pouco abordado pela pesquisa industrial (PARK et al., 2009).

Considerando-se que as decisões que têm impacto sobre o consumo de energia de um sistema de produção fazem parte de todas as fases do ciclo de vida de uma instalação industrial (WEINERT; CHIOTELLIS; SELIGER, 2011), passando pelo projeto da fábrica, a

disposição física dos sistemas auxiliares, projeto dos produtos e respectivos processos produtivos, faz-se aparente a utilização de tecnologias emergentes que permitam o modelamento e a simulação de todo o ciclo de vida destas unidades.

A fábrica digital aparece, desta forma, como uma inovação de Tecnologia da Informação (TI) que busca aprimorar os processos de desenvolvimento do produto pela introdução de novos processos e softwares que proporcionam maior colaboração com o desenvolvimento dos processos de manufatura (DE CARLI; DELAMARO; SALOMON, 2010). Sendo assim, a aplicação de conceitos de manufatura digital mostra-se como uma ferramenta potencial para a análise e apoio à tomada de decisão frente à eficiência energética global de instalações industriais, haja vista que estes sistemas concentram, entre outros recursos, diferentes tecnologias de simulação tais como virtualização de *layouts*, comissionamento virtual de instalações e simulação de processos.

Neste contexto, o trabalho proposto aborda a geração de cenários de simulação para análise e incremento de indicadores de eficiência energética em sistemas de produção a partir de ferramentas de manufatura digital, considerando-se que esta vertente de utilização destes sistemas ainda é pouco abordada na literatura existente.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar indicadores de eficiência energética em sistemas de produção visando a melhoria dos respectivos índices e a redução do consumo global de energia elétrica nestes sistemas, utilizando-se, para tal finalidade, de modelos de simulação implementados dentro do contexto de manufatura digital.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Contribuir para apontar às empresas lacunas no uso racional de energia elétrica;
- b) Investigar oportunidades relevantes de economia de energia elétrica em sistemas de produção;
- c) Apoiar o processo de tomada de decisão referente à melhor opção contratual junto às distribuidoras, a partir de dados simulados de previsão de consumo e demanda;
- d) Analisar a influência de cada setor da planta no consumo global de energia elétrica, identificando as áreas com maior potencial de incremento nos indicadores de eficiência energética.

1.3 JUSTIFICATIVA

A fragilidade do sistema energético brasileiro, associada a fenômenos climáticos que interferem diretamente na principal matriz aplicada, evidencia a necessidade da busca de soluções para o atendimento da demanda energética e seu crescimento previsto em diferentes cenários. De maneira complementar, o custo da energia elétrica torna-se cada vez mais significativo, sendo um importante vetor a ser considerado na competitividade empresarial (FIRJAN, 2011).

Neste cenário, as soluções de resultado mais rápido e que não dependem de ações governamentais recaem sob a eliminação do desperdício de energia elétrica, ou seja, no incremento da eficiência energética das instalações (MOREIRA, 2008).

Considerando-se que o setor industrial é o maior consumidor de energia elétrica (EPE, 2013), salienta-se a importância de estudos direcionados à eficiência energética voltados a este campo. Haja vista que investimentos com modificações de produtos, processos, tecnologias e arranjos físicos são altos e arriscados, a proposta de utilização de simulação permite a aplicação de testes com cenários alternativos para indicar as soluções de incremento de eficiência mais viáveis, através de modelos computacionais (PEREIRA; COSTA, 2012).

Desta forma, espera-se que os resultados a serem apresentados neste trabalho sirvam de subsídio para potencializar a utilização de ferramentas de manufatura digital aplicadas ao contexto de eficiência energética em sistemas de produção.

1.4 RELEVÂNCIA

Este trabalho contribui como suporte à aplicação de práticas sustentáveis nas organizações, buscando-se motivar a análise de indicadores de eficiência energética com o objetivo de propor novas soluções para a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de produção.

Adicionalmente, avaliando-se a literatura existente observa-se que os estudos de modelagem e simulação para obtenção de indicadores de eficiência energética até então desenvolvidos envolvem apenas a avaliação do processo, através da aplicação de simulação de eventos discretos. Neste cenário, este trabalho traz contribuições ao utilizar os conceitos de manufatura digital associados aos efeitos de sustentabilidade ambiental das empresas, sendo esta uma vertente emergente e ainda não profundamente explorada. A utilização de ferramentas de simulação integradas à um ambiente de manufatura digital permite ainda a

obtenção do diagnóstico global de eficiência energética em sistemas de manufatura industriais.

1.5 METODOLOGIA

Um número crescente de trabalhos acadêmicos referentes ao melhor aproveitamento de energia elétrica no ambiente industrial tem sido publicado em revistas e anais de congressos nos últimos anos. Nesta dissertação, trabalhos de pesquisa relacionados ao tema de eficiência energética no setor industrial, além de dados referentes à geração e consumo brasileiros foram reunidos e estudados.

Após esta etapa de triagem, prosseguiu-se com a classificação dos artigos selecionados em três grupos pré-estabelecidos:

- a) conceitos, teorias e tecnologias voltadas à eficiência energética;
- b) dados nacionais de geração e consumo de energia elétrica;
- c) aplicações de simulação e sistemas de manufatura digital.

A detalhada análise de conteúdo do material selecionado possibilitou posteriormente a descrição e interpretação para a construção teórica desta dissertação.

Referente ao tipo de pesquisa, este trabalho prevê a utilização da abordagem quantitativa, sendo classificada como explicativa em relação aos objetivos. O método utilizado é a simulação que, de acordo com Banks et al. (2004), tem se tornado uma das técnicas de análise de sistemas complexos de manufatura mais populares e de melhor custo benefício, tornando possível o estudo do sistema sem que seja necessário construí-lo na realidade, ou mesmo proceder com modificações nesse sistema, e estudar os resultados das mesmas, sem que haja necessidade de alterá-lo previamente (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2004).

Neste contexto, modelos de simulação de sistemas de produção foram criados, contando com a alocação de dados e lógicas adicionais de energia elétrica, visando obter resultados fiéis ao comportamento do sistema e possibilitando a análise dos resultados obtidos. Dentre as diversas estruturas encontradas na literatura para ilustrar as etapas de um estudo de simulação, o presente trabalho utiliza a sistemática baseada nas etapas de desenvolvimento e implementação de um modelo de simulação computacional proposta por Banks et al. (2004), apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Etapas de um modelo de simulação computacional

Fonte: Banks et al., 2004

Esta sistemática foi implicitamente utilizada neste estudo, pois contempla todas as etapas necessárias para uma boa estruturação da modelagem de um processo de manufatura a partir da simulação computacional. Os passos que compõem esta sistemática são descritos a seguir (BANKS et al., 2004):

- a) formulação do problema: define-se o propósito de estudo, ou seja, por que estudá-lo?
- b) plano de projeto e definição de objetivos: estabelece-se o(s) objetivo(s) da pesquisa e levanta-se os recursos necessários – cronograma de execução, pessoal, infraestrutura, requisitos de hardware e software e custo dos procedimentos;
- c) formulação do modelo conceitual: traduz-se o sistema real para um modelo conceitual preliminar através de relações matemáticas e lógicas, visando-se definir os principais componentes e as interações entre os elementos do sistema;
- d) coleta de dados e configuração do modelo: reúnem-se informações e dados disponíveis que serão processados, tais como fluxos de informações, recursos, procedimentos de operação e considerações teóricas. Configura-se no software de simulação o modelo conceitual tornando-o, desta forma, um modelo operacional;
- e) verificação da configuração: trata-se de realizar testes com o modelo, de modo a verificar se o mesmo foi construído conforme desejado;
- f) validação do modelo: verifica-se se o modelo é uma boa representação do sistema real e se suas respostas são compatíveis com as saídas do mesmo, dentro de um nível de confiança desejável;

- g) projeto experimental: planejam-se os conjuntos de variáveis controláveis e parâmetros do modelo que serão utilizados nos experimentos, delineando-se como as corridas de simulação serão executadas. Executa-se o modelo, visando alcançar resultados confiáveis, validados através da utilização de abordagens estatísticas;
- h) documentação e análise de resultados: análise e interpretação dos resultados obtidos através da simulação. Resultados e procedimentos são registrados de forma clara e concisa, com o objetivo de serem utilizados nas análises e nos processos de tomada de decisão.

Seguindo-se ainda o processo de modelagem apresentado na Figura 1, as seguintes atividades específicas foram realizadas:

- a) aquisição de dados relacionados ao comportamento energético de equipamentos e subsistemas;
- b) categorização dos dados de energia elétrica em conjuntos de equipamentos;
- c) elaboração e validação de modelos para obtenção de indicadores;
- d) representação e análise dos dados obtidos.

O software de simulação computacional Siemens *Plant Simulation*[®] foi utilizado como ferramenta para analisar os sistemas de produção e seus respectivos sistemas de energia elétrica neste trabalho. Conforme exposto por Sakurada e Miyake (2009), os simuladores oferecem vantagens como requerimento de tempo relativamente menor para construção do modelo e maior facilidade de utilização apoiada em menus e gráficos amigáveis.

É válido salientar que a escolha por uma ferramenta de simulação integrada a um sistema de manufatura digital deve-se ao foco aplicado nesta pesquisa, que está direcionado para a eficiência energética considerando-se a relação existente desta variável com a produtividade, processos de fabricação, programação de produção e interação entre os ambientes que constituem um sistema de produção.

Este estudo está estruturado da seguinte forma: a próxima seção fornece a base teórica sobre eficiência energética em atividades de manufatura, apresenta uma visão geral do cenário energético brasileiro, assim como a inserção do setor industrial no mesmo, discute as principais barreiras e incentivos para a implementação de medidas de eficiência e exibe uma ampla compreensão sobre as tecnologias de simulação existentes. No capítulo 03 são apresentados os procedimentos do estudo e a descrição detalhada do sistema abordado, englobando os parâmetros considerados e os cenários propostos de avaliação, utilizados para

apoiar a validade dos resultados obtidos. O capítulo 04 expõe os estudos de simulação executados para avaliação de indicadores de eficiência energética em sistemas de produção, além de apresentar e discutir os resultados obtidos através da aplicação das diferentes estratégias propostas. Por fim, o capítulo 05 sumariza as conclusões do estudo, envolvendo o detalhamento das contribuições realizadas e as limitações encontradas, indicando assim novas oportunidades para pesquisas futuras.

1.6 PUBLICAÇÕES

O artigo científico derivado deste estudo foi aceito para apresentação no Congresso PICMET 2016 e encontra-se em processo de submissão ao periódico *Journal of Cleaner Production*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Cauchick Miguel (2012), o referencial teórico delimita as fronteiras do que será investigado, proporciona suporte teórico à pesquisa, explicita o grau de evolução – estado da arte – do tema estudado, além de ser um indicativo de familiaridade e conhecimento sobre o assunto para o pesquisador. Deste modo, procede-se a seguir com uma revisão da literatura, a qual contempla os temas abordados neste estudo.

2.1 GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM ATIVIDADES DE MANUFATURA

A indústria de manufatura desempenha um papel indispensável no âmbito da economia global, sendo responsável não apenas por transformar materiais e informações em bens para a satisfação das necessidades humanas e das demais indústrias em todo o mundo, mas também por prover parcelas significativas de emprego e representar grande poder econômico (SALONITIS; BALL, 2013). Em contrapartida, o setor de manufatura corresponde também por 37% de todo o consumo mundial de energia primária (IEA, 2013), o que coloca os custos envolvidos e os impactos ambientais relacionados como fatores cada vez mais influentes na operação destas organizações. Esta transformação tem sido observada, majoritariamente, devido ao aumento dos custos de energia resultante da escassez de recursos naturais, associado à crescente conscientização da sociedade frente à imagem das corporações e a leis governamentais e normatizações sancionadas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental das atividades de fabricação (ABELE; BRAUN; SCHRAML, 2015).

Considerando-se que as empresas de manufatura necessitam de energia elétrica como um elemento primário a fim de produzir bens para a sociedade, limitar a produção não é uma opção viável. Neste contexto, diante de um cenário cada vez mais desafiador, competitivo e regulado, Herrmann et al. (2011) afirmam que a melhoria da eficiência energética se torna uma opção extremamente promissora para as empresas de manufatura. De maneira complementar, segundo Zhou et al. (2016) a melhoria da eficiência energética nas atividades de manufatura é uma tendência inevitável para a conservação de energia, redução de emissões e aderência a práticas de sustentabilidade.

Neste aspecto, o tema de eficiência energética tem presenciado elevação em seu campo de aplicação, indo além das indústrias intensivas em energia elétrica tradicionais, tais como o aço, cimento, indústrias químicas e de papel e celulose (PALM; THOLLANDER, 2010). Conforme observado por Duflou et al. (2012), nos setores voltados para a fabricação

discreta, a atenção da pesquisa acadêmica e industrial para o tema de eficiência energética se tornou visível principalmente na última década, impulsionada pela obtenção de melhorias significativas em termos econômicos e ambientais.

Conforme afirmam Salonitis e Ball (2013), nas últimas décadas a demanda por bens aumentou e, conseqüentemente, a demanda por recursos naturais e energia também sofreu significativo incremento. Neste cenário, visando-se obter um sistema mais sustentável, faz-se necessária a utilização de métodos de produção energeticamente mais eficientes e a evolução da estratégia da indústria de manufatura de "ganho máximo com capital mínimo" para "ganho máximo com recursos mínimos".

Herrmann et al. (2011) afirmam ainda que a análise individual de máquinas e equipamentos é necessária, porém não é suficiente para uma perspectiva holística da eficiência energética nas atividades de manufatura, sendo a avaliação integrada de linhas e instalações um propulsor de novos potenciais de melhoria. Neste aspecto, Duflou et al. (2012) apresentam uma avaliação das metodologias e tecnologias que podem ser aplicadas nos diferentes níveis dos sistemas de manufatura – desde equipamentos individuais até toda a corporação –, com o objetivo de contribuir para o incremento dos indicadores de eficiência energética. Uma síntese deste estudo é apresentada no Quadro 1:

Quadro 1 – Metodologias de eficiência aplicáveis aos diferentes níveis dos sistemas de produção (continua)

Tipo de sistema	Descrição	Metodologias aplicáveis
Dispositivo isolado	Equipamento individual ou máquina-ferramenta presente no sistema de fabricação, responsável pela execução de um processo na unidade.	<ul style="list-style-type: none"> - Atualização do projeto de máquinas-ferramentas e aplicação de controle com múltiplos estados pode aumentar significativamente a eficiência energética sem afetar a produtividade. A falta de prioridade dos fabricantes de máquinas para o tema de eficiência energética abre um espaço substancial de melhoria utilizando-se de métodos e técnicas já conhecidos; - Atribuição, durante o planejamento de produção, de nível de utilização próximo à capacidade nominal das máquinas; - Configuração de parâmetros de processo adequados à operação a ser executada.

(conclusão)

Tipo de sistema	Descrição	Metodologias aplicáveis
Linha Célula Sistema multi-máquinas	Organização lógica de equipamentos no sistema de fabricação, que atuam em série ou paralelo com o objetivo de executar uma tarefa específica como a fabricação de uma peça ou a montagem de um conjunto. Equipamentos de apoio, como esteiras, estão incluídos neste grupo.	- Valores de demanda contratada e consumo total de energia elétrica podem ser minimizados através de métodos de planejamento e aprimoramento suportados por técnicas de simulação, permitindo assim a avaliação global da combinação de processos, máquinas e <i>buffers</i> , bem como aspectos como o tamanho de lotes, a programação de ordens e a velocidade de produção. Possibilita, ainda, a análise dos períodos do dia mais favoráveis para produção perante o aspecto do custo de energia, devido às tarifas diferenciadas em determinados horários.
Unidade	Local que abriga vários equipamentos distintos, que podem ou não estar logicamente organizados em linhas, células, etc. Equipamentos de apoio, tais como geradores de energia e sistemas de HVAC, estão incluídos neste grupo.	- Aplicação de técnicas de simulação para determinação de métricas e identificação dos fluxos de energia de sistemas de produção integrados e complexos; - Avaliação criteriosa do <i>layout</i> da fábrica durante a etapa de projeto e instalação de novos equipamentos; - Dimensionamento adequado de equipamentos e sistemas auxiliares, tais como compressores de ar e sistemas de HVAC, de acordo com as necessidades locais da instalação; - Planejamento de produção integrado em nível de unidade, objetivando aprimorar o consumo total de energia.
Planta multi-fábricas	Diferentes instalações cuja proximidade física permite fazer uso de possíveis sinergias em termos de aprimoramento de utilização de energia.	- Aplicação de princípios de simbiose industrial, implementados através do compartilhamento de sistemas de utilidades e subprodutos entre as indústrias, objetivando incrementar a eficiência global em termos de energia favorecendo-se da localização geográfica propícia.
Organização Cadeia de suprimentos global	Todo o sistema de produção, composto pelas instalações industriais individuais, a infraestrutura necessária para suportar as instalações, bem como a cadeia de suprimentos envolvida.	- Aplicação de estratégias de geração de energia para abastecimento próprio das unidades, inclusive a partir de resíduos provenientes dos respectivos processos produtivos; - Seleção adequada dos locais de produção, armazenamento e distribuição, os quais o consumo energético pode ser influenciado de acordo com as condições climáticas locais e eventuais necessidades de transporte.

Fonte: Autor “adaptado de” Dufrou et al., 2012

Conforme observa-se no Quadro 1, o planejamento da produção exerce um papel preponderante no consumo de energia em diferentes níveis dos sistemas de produção. No entanto, segundo Thiede et al. (2013), apenas recursos como matérias-primas e mão-de-obra

são tradicionalmente considerados como variáveis no planejamento e controle da produção, negligenciando-se aspectos como o consumo de energia elétrica exigido. Neste caso, o panorama atual exige também a incorporação de métricas sustentáveis neste planejamento, tais como o impacto ambiental da produção.

Ademais, usualmente o desempenho de um sistema de produção é avaliado apenas através da monitoração de quatro atributos principais de manufatura: custo, tempo, qualidade e flexibilidade, sem levar em consideração a utilização de energia elétrica ou os recursos de eficiência fundamentais para a sustentabilidade. De maneira geral, as pesquisas relacionadas à eficiência em manufatura estiveram focadas basicamente em aprimoramentos tecnológicos, muitas vezes à custa de maiores consumos de energia (SALONITIS; BALL, 2013).

Como o consumo de energia elétrica representa um dos principais contribuintes para as alterações climáticas e é um fator de custo significativo, faz-se necessária uma melhor compreensão de seu uso dentro das unidades de produção, possibilitando assim a exploração de oportunidades de minimização de consumo em toda a operação. Neste aspecto, a modelagem do consumo de energia elétrica dos processos pode proporcionar uma melhor compreensão de onde e como a energia está sendo utilizada, permitindo em seguida a identificação das potenciais áreas de melhoria (THIEDE et al., 2013). No entanto, uma análise completa de um sistema produtivo deve considerar toda a dinâmica das variáveis que o compõem, adicionando à esta avaliação aspectos técnicos e econômicos, tais como saída de produtos, disponibilidade e custos envolvidos.

Apesar dos grandes esforços já realizados, tais como a substituição isolada de acionamentos elétricos ou melhorias integrais nos processos de produção, ainda há um potencial significativo na implantação de medidas de eficiência energética economicamente viáveis para a indústria de manufatura (ABELE; PANTEN; MENZ, 2015). Conforme colocado por Abele, Braun e Schraml (2015), novas abordagens devem ser desenvolvidas, as quais possibilitem a implementação de soluções de eficiência energética em sistemas de manufatura dinâmicos, que apresentem condições de demanda e exigências variáveis.

De acordo com Herrmann et al. (2011), diversos estudos demonstram a possibilidade de alcance de progressos de 10 a 30% neste segmento, apenas com a aplicação de tecnologias já disponíveis. Uma vez observada a discrepância entre as soluções disponíveis e o grau de aplicação das mesmas na indústria, métodos adequados de suporte à implementação e avaliação de impacto destas ações promissoras, tais como o desenvolvimento de métricas e indicadores dedicados, se fazem cada vez mais necessários.

2.2 INICIATIVAS DE PESQUISA VOLTADAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MANUFATURA

Aspectos como conscientização ambiental, exigência de redução de custos e o consequente acirramento da competitividade, combinados ao avanço tecnológico e acadêmico têm acelerado a busca das empresas de manufatura por sistemas de produção sustentáveis, os quais aliam aspectos econômicos, ambientais e seus respectivos efeitos sociais (SHAHBAZPOUR; SEIDEL, 2006).

Jaccard, Nyboer e Fogwill (1993) e Abele, Panten e Menz (2015) indicam que é necessária a busca por aspectos alternativos no gerenciamento de energia elétrica em atividades de manufatura em relação à escolha tradicional de apenas se focar na substituição de acionamentos existentes por motores de alto desempenho. Desta forma, os autores propõem que a mensuração da eficiência energética quanto à utilização da energia elétrica deve ser do tipo "dinâmica", isto é, ponderando não apenas a eficiência ante os equipamentos e respectivas tecnologias em uso – eficiência energética estática –, mas que essas medidas sejam combinadas com tecnologias emergentes, as quais embora casualmente não estejam disponíveis na planta industrial, possam vir a sê-lo através de novas pesquisas. Os autores evidenciam ainda que, na prática, o potencial total de eficiência energética industrial, respeitante à utilização de energia elétrica, é uma função das alterações estruturais e de processos, sendo estas consideradas sob uma visão mais ampla do que tange apenas a substituição de equipamentos e componentes agregados.

Conforme pontuado por Leite (2010), a simples aquisição de equipamentos mais eficientes, apesar de desejável, não é garantia de eficiência energética, pois grande parte da economia potencial está na forma de utilizar a energia. Neste contexto, observa-se recentemente um crescente interesse no desenvolvimento de soluções técnicas que objetivam reduzir o consumo de energia elétrica nos processos de fabricação, tendência esta impulsionada principalmente por novos regulamentos e leis governamentais que visam diminuir o impacto ambiental resultante das atividades de manufatura (FRIGERIO; MATTA, 2015). Desta forma, a urgência e a importância atribuídas à implementação destas ações tem sido gradualmente reconhecidas tanto pela indústria quanto pelo meio acadêmico (SUN et al., 2014).

Galitsky e Worrell (2008), por exemplo, apresentam um sumário de oportunidades de melhoria de eficiência energética e consequente redução de custos para indústrias montadoras de veículos. Este estudo resulta na consolidação de um relatório com diversas medidas de

redução do consumo de energia elétrica para aplicação em subsistemas presentes em montadoras – suprimento de ar comprimido, iluminação, pintura, estamparia entre outros. Cada medida apresentada foi elaborada a partir de estudos de casos prévios, os quais corroboram a viabilidade financeira das ações propostas e os períodos de retorno típicos.

Adicionalmente a esta iniciativa, uma série de esforços de pesquisa relativos à redução do consumo de energia elétrica têm-se centrado no desenvolvimento de máquinas e processos individualmente mais eficientes. Nesta vertente, um estudo de destaque foi conduzido por Mouzon e Yildirim (2008), o qual investigou o problema de programação de uma única máquina com o objetivo de minimizar o consumo total de energia elétrica. Desta forma, os autores estudaram o comportamento de uma máquina que não representava o gargalo de um *job shop*, apresentando diversas regras de desligamento para a mesma nos casos a qual permaneceria inativa por determinados períodos de tempo. Uma análise detalhada do desempenho obtido apontou que a aplicação das regras propostas de desligamento da máquina até que a mesma seja necessária, ao invés de deixá-la ociosa, resultou em uma economia significativa do consumo de energia elétrica para equipamentos de manufatura subutilizados.

Estudo conduzido por Schmitt, Bittencourt e Bonefeld (2011) concluiu também que os equipamentos de apoio ao processo produtivo, tais como os presentes em sistemas de utilidades, podem facilmente exigir mais energia elétrica do que o necessário. Isto se deve ao fato de que estes sistemas auxiliares continuam consumindo energia durante estados não produtivos, pois devem estar disponíveis quando a produção é reiniciada. Isto gera um excedente de consumo que, conforme apontado pelos autores, poderia ser reduzido através da aplicação do controle interligado do estado de operação entre os equipamentos. Isto sugere que os esforços para redução do consumo de energia elétrica voltados exclusivamente a máquinas ou processos individuais podem estar desconsiderando uma grande oportunidade, presente através de alterações em nível de sistema e controle coordenado entre dispositivos.

Neste contexto, considerando-se que os sistemas de produção modernos são dinâmicos e complexos, novos estudos surgiram visando abordar as oportunidades de redução do consumo de energia elétrica em sistemas com interdependência entre diferentes máquinas.

Dentre os trabalhos que seguem esta tendência, destaca-se o conduzido por Chang et al. (2013), o qual apresenta um método para identificação de oportunidades – janelas – de economia para o controle de energia elétrica em tempo real de uma linha de manufatura automotiva com máquinas em série. Através da análise de eventos aleatórios perturbadores ao funcionamento ideal do conjunto, como quebras e paradas não programadas, um método baseado em dados de tempo real foi desenvolvido para quantificar as oportunidades de

economia de energia – ESOs – da linha. Durante a execução destas janelas de oportunidade, os estados de operação das máquinas são ajustados através de ações de controle coordenadas, visando reduzir o consumo global de energia elétrica. O estudo, validado através de casos de simulação, indica que o exercício das janelas de oportunidade através do controle proposto propicia um elevado potencial de economia de energia sem afetar a produção.

Seguindo esta mesma linha, Sun e Li (2013) propõem um método para o controle de energia elétrica em tempo real de sistemas de fabricação multimáquinas, através da determinação coordenada do modo de operação das máquinas com o objetivo de reduzir os níveis de consumo de energia, sem sacrificar a produtividade do sistema. Os principais conjuntos de dados considerados nesta análise incluem o tempo de ciclo das máquinas, os modos de consumo de energia elétrica, capacidade e conteúdo de *buffers* e histórico de falhas. Os resultados apresentados, obtidos através de um estudo de caso numérico de uma linha de montagem de automóveis, ilustram a eficácia e a eficiência do método proposto. O controle de utilização da capacidade dos *buffers* desempenha um papel significativo na manutenção do rendimento do sistema quando da aplicação das regras de controle de energia durante as janelas de oportunidade identificadas.

Além da redução de consumo, trabalhos acadêmicos recentes têm-se focado também na apresentação de estudos que exploram a redução da demanda elétrica de sistemas de manufatura nos horários de ponta.

Fernandez, Li e Sun (2013) e Sun et al. (2014) apresentam modelos de aplicação de *buffers* voltados apenas à redução da demanda elétrica durante os horários de ponta em sistemas multimáquinas, através da construção de estoques intermediários entre as máquinas durante os períodos fora de pico. Esta estratégia permite o desligamento de determinados equipamentos durante o horário de ponta, diminuindo assim a demanda no período crítico e a consequente necessidade de aumento da carga disponível. Desta forma, modelos matemáticos foram elaborados a partir do método de programação não linear com o objetivo de minimizar o custo total de operação do sistema considerando-se fatores como o custo dos estoques propostos, o custo da energia elétrica consumida/demandada e o custo referente à eventuais perdas de produção ao longo do horizonte de operação devido aos desligamentos programados. Os resultados obtidos através de um estudo de caso numérico de uma linha de montagem de automóveis demonstraram que a aplicação do método proposto resulta em uma redução significativa do consumo de energia elétrica e dos custos totais considerados, sendo esta uma alternativa de balanceamento de produção que envolve tanto aspectos econômicos quanto a adesão à práticas sustentáveis.

2.3 INDICADORES DE DESEMPENHO – KPIS

Indicadores de desempenho ou *key performance indicators* (KPIs) possuem um papel essencial na avaliação da eficiência e eficácia de sistemas de manufatura. Medidas de desempenho tradicionais neste campo incluem fatores como qualidade, custo, tempo de entrega e segurança (MAY et al., 2015). Neste contexto, uma vez que diferentes aspectos de desempenho são medidos por meio de indicadores, a identificação de KPIs adequados para a avaliação de eficiência energética em sistemas industriais faz-se também necessária.

Conforme exposto por Bunse, Sachs e Vodicka (2010), as organizações costumam realizar mudanças em suas instalações produtivas apenas quando visualizam benefícios. Desta forma, para detectar avanços na área de eficiência energética, apoiando a tomada de decisão relacionada à esta disciplina e avaliando os potenciais de melhoria, a adoção de indicadores torna-se fundamental.

Diante deste cenário, a avaliação padronizada do desempenho de eficiência energética de equipamentos, processos, fábricas e plantas é um primeiro passo para a gestão energética eficaz nas empresas de manufatura. Os indicadores relativos à energia elétrica permitem, assim, a avaliação do potencial de melhoria de medidas de eficiência energética, antes e após a sua implementação. Neste sentido, KPIs servem como uma medida de avaliação se um sistema está operando como fora projetado, assim como propiciam a evolução do sistema para um valor-alvo definido (MAY et al., 2015).

Segundo Bunse et al. (2011), tornou-se evidente a necessidade de KPIs exclusivos voltados à eficiência energética, visando acompanhar as mudanças e melhorias referentes à esta disciplina efetuadas nos níveis de processo e de planta. Adicionalmente, os mesmos autores afirmam ainda que KPIs apropriados devem não só permitir a comparação dos perfis de consumo de energia elétrica entre máquinas e processos, mas também possibilitar a avaliação do desempenho de eficiência energética junto à outras empresas e organizações.

Neste contexto, apoiados pelos esforços de pesquisa verificados na última década com o objetivo de aprimorar os indicadores de eficiência energética na indústria de manufatura, diversos pesquisadores passaram a explorar temas voltados à geração de métricas, normas e regulamentações voltadas a este campo. Dentre os trabalhos desenvolvidos, destaca-se o conduzido por Bunse et al. (2011), o qual salienta a importância dos indicadores de desempenho de produção relacionados à energia elétrica como uma necessidade fundamental da indústria de manufatura para identificar ineficiências de consumo de energia das plantas, com ênfase no potencial de melhoria no nível das instalações produtivas.

Através do estudo realizado por Bunse et al. (2011) percebe-se a existência de uma série de KPIs relacionados à energia, os quais podem ser categorizados majoritariamente em:

- a) econômicos/financeiros: custo total de energia, custo de energia/unidade, entre outros;
- b) físicos: energia consumida/unidade produzida; consumo total de energia, entre outros.

Conforme apontado por May et al. (2015), os indicadores econômicos são úteis ao nível estratégico, pois podem propiciar a comparação de custos de operação entre diferentes setores de atividade. Neste caso, quando se visa apenas o aprimoramento de determinados processos de fabricação, os indicadores físicos tornam-se mais esclarecedores.

De acordo com Bunse et al. (2011), não há um indicador de eficiência energética único que possa ser aplicado em todas as situações e cenários. Neste contexto, o mesmo autor destaca que os indicadores adequados têm de ser definidos de acordo com a decisão a ser tomada ou com a ferramenta de decisão aplicada. Seguindo este princípio, May et al. (2015) constatarem através de extensa revisão da bibliografia existente que tanto o meio acadêmico quanto a indústria ainda carecem de abordagens específicas de indicadores de eficiência energética voltados especificamente às atividades produtivas do setor de manufatura, os quais devem considerar as sinergias e *trade-offs* com as demais decisões da gestão de produção, tais como qualidade, manutenção, planejamento da produção entre outros aspectos.

Embora valores absolutos, como o consumo de energia elétrica por ano ou por produto, forneçam uma visão geral sobre o estado atual de consumo de energia frente à períodos históricos, os mesmos não fornecem suporte à tomada de decisão, transparência e identificação clara dos itens específicos que requerem algum tipo de ação. Desta forma, faz-se necessária a implementação e análise de eficiência energética a partir de indicadores específicos voltados à sistemas de manufatura (MAY et al., 2015). A aplicação destes indicadores permite:

- a) indicar limitações estruturais que impactam no incremento da eficiência energética;
- b) tornar o perfil de comportamento de consumo de energia elétrica do sistema de produção transparente, indicando relações com outros aspectos de manufatura;
- c) identificar relações de causa e efeito;
- d) preparar ações para medidas de melhoria.

Diante deste cenário, May et al. (2015) apresentam um método de apoio às empresas de manufatura no desenvolvimento de indicadores de desempenho voltados à energia elétrica. Através do método proposto, os autores propiciam a obtenção de indicadores que permitem a interpretação de relações de causa-efeito, independentemente do setor ou produto produzido, apoiando assim a identificação de pontos fracos e campos de melhoria de eficiência energética relacionados com a gestão da produção e operações.

Considerando-se que os indicadores de desempenho energético atualmente aplicados são calculados através de medidas agregadas de consumo – kWh/mês ou kWh/produto –, May et al. (2015) propõem uma abordagem na qual seja possível também analisar de maneira mais aprofundada as relações de causa-efeito entre os estados de manufatura – causas de ineficiências energéticas dos recursos produtivos –, configurações de máquina e consumo de energia elétrica.

Neste contexto, um novo método, chamado de e-KPI pelos autores, é proposto. Este método conecta estados de produção medidos em tempo à estados de energia elétrica medidos em consumo, através de relações de causa-efeito. O conceito de e-KPI refere-se a indicadores compostos de dados de consumo de energia e dados de produção, destacando-se os níveis de eficiência para diferentes operações de recursos produtivos que consomem energia elétrica. Isto permite uma identificação clara dos estados de manufatura que apresentam maior ineficiência considerando-se também a variável de consumo de energia elétrica e possibilita, conseqüentemente, a elaboração de planos de ação que objetivem a redução tanto da quantidade de tempo gasto quanto da energia consumida nas operações.

Neste aspecto, a visão energética do recurso é obtida através da análise dos requisitos de consumo – W – para cada período de tempo, o qual pode ser potencialmente afetado por decisões tomadas pela gestão do recurso ou do sistema de produção. Estes requisitos de consumo, no método, representam os estados de energia, nos quais o aprimoramento do desempenho energético é possibilitado exclusivamente por critérios de gestão, tais como o aprimoramento da programação da produção. Desta forma, os estados de energia que um recurso pode assumir durante sua operação e que podem sofrer alterações em seu comportamento através de alterações de gestão foram identificados pelos autores e são descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Estados de energia

Estado de energia	Descrição
Desligado	Equipamento está desligado: nenhum consumo de energia elétrica é requerido.
Desenergização	Energia elétrica é consumida para o desligamento do equipamento.
<i>Standby</i>	Equipamento apresenta a maioria dos componentes desligados e não está pronto para processar peças. Apenas alguns componentes são mantidos ativos e consomem energia elétrica, a fim de reduzir o tempo de reativação do equipamento.
Manutenção	Equipamento está sendo reparado com algumas ações específicas que necessitam de energia elétrica.
Operacional	Equipamento não está processando peças, porém mantém energizados todos os componentes necessários para voltar a produzir imediatamente caso solicitado.
<i>Setup</i>	Energia elétrica é consumida para troca de ferramenta ou ajuste do equipamento para produção de um produto diferente do anterior.
Energização	Energia elétrica é consumida para a inicialização do equipamento pós desligamento.
Processamento	Equipamento está processando peças.

Fonte: Autor “adaptado de” May et al., 2015

Em contrapartida, a visão temporal de utilização do recurso envolve a determinação de todos os estados de fabricação observados durante o regime de operação do mesmo. Desta forma, estes estados de manufatura definem uma condição de ineficácia que impacta o consumo de energia elétrica do próprio recurso analisado. Por esta razão, os estados de manufatura identificados pelos autores, detalhados no Quadro 3, são definidos como variáveis que afetam o consumo de energia elétrica.

Quadro 3 – Estados de manufatura

Estado de manufatura	Descrição
Ausência e bloqueio	Inatividade devido a motivos de gestão, relativos ao planejamento da produção (operações de carga e sequenciamento)
Esperando ferramenta	Inatividade causada pela ausência de ferramenta na máquina
Início diário	Se a empresa trabalha em 1 ou 2 turnos por dia, as máquinas são reiniciadas diariamente. Se a empresa trabalha em 3 turnos com 5 dias de trabalho, a máquina é reiniciada após o fim de semana.
Início pós feriados	Reinício de equipamentos pós feriados.
<i>Setup</i>	Troca de ferramenta ou ajuste do equipamento para produção de um produto diferente do anterior
Ausência de Ordens (MO)	Inatividade causada pela ausência inesperada de ordens de produção
Ausência de Materiais (MM)	Inatividade causada pela ausência inesperada de matéria-prima
Teste e Amostragem	Máquina está processando lotes para teste e amostragem
Microparadas	Microparadas de máquina
Manutenção corretiva	Período no qual a máquina permanece em estado de quebra / manutenção não programada
Manutenção planejada	Período no qual a máquina permanece em manutenção programada
Rejeitos durante <i>start up</i>	Intervalo utilizado para a produção de peças rejeitadas durante o <i>start up</i> da máquina
Rejeitos / Retrabalho em produção	Intervalo utilizado para a produção de peças rejeitadas e retrabalhos durante a produção
Paralisações	Paralisações dos colaboradores que afetem o desempenho das máquinas

Fonte: Autor “adaptado de” May et al., 2015

Após a identificação dos estados de manufatura e energia para o recurso produtivo, os autores buscaram estabelecer ligações entre ambos, representando assim o impacto específico que um estado de manufatura tem em um determinado estado de energia.

O diagrama de relacionamento obtido, ilustrado na Figura 2, foi determinado através de conhecimento prévio dos autores e de entrevistas semiestruturadas com parceiros industriais da pesquisa, resultando em uma base de conhecimento para o desenvolvimento dos KPIs de energia propostos pelo estudo.

Figura 2 – Relações estabelecidas entre estados de manufatura e estados de energia

Fonte: Autor “adaptado de” May et al., 2015

A partir dos relacionamentos estabelecidos entre estados de manufatura e estados de energia, foi possível aos autores elaborar um diagrama de energia, apresentado na Figura 3, o qual ilustra o consumo de energia elétrica associado à cada estado de manufatura, agregando os intervalos de tempo – T – nos quais a máquina tenha gasto um determinado estado de energia – W . A representação através do diagrama faz-se oportuna mediante a necessidade de construção de KPIs que permitam quantificar os diferentes impactos das variáveis envolvidas.

As parcelas de consumo de energia elétrica apresentadas no diagrama são apenas ilustrativas – sem escala –, tendo como objetivo neste estudo apenas a representação do conceito proposto pelos autores.

Figura 3 – Diagrama de energia

Fonte: Autor “adaptado de” May et al., 2015

Os pequenos retângulos são os estados de manufatura, os quais estão associados às respectivas potências elétricas através das setas superiores do diagrama. O primeiro pilar à esquerda representa o total de energia elétrica consumida no tempo teórico de produção,

sendo que os demais pilares representam a estratificação das parcelas correspondentes aos diferentes estados de manufatura até a obtenção do percentual referente ao consumo de energia elétrica que gera valor, ou seja, a energia útil diretamente associada à produção de unidades vendáveis.

Desta forma, cada um dos pilares obtidos pode ter seu desempenho energético avaliado individualmente, de acordo com a relação estabelecida entre os estados de manufatura e as respectivas potências elétricas.

O método aplicado permite visualizar que dois tipos de perdas distintos, com o mesmo tempo de duração, podem não ter o mesmo peso em termos de eficiência energética. Por esta razão, os autores focam na identificação de métricas que permitam a visualização e consequente redução da contribuição dos estados de manufatura com o maior impacto sobre o total consumo de energia elétrica do recurso produtivo. Neste aspecto, o estudo de May et al. (2015) apresenta um conjunto de e-KPIs derivados de um indicador principal, chamado de *Lean Energy Indicator*.

O *Lean Energy Indicator* é uma métrica global, a qual apresenta o quão eficiente é a utilização do equipamento na produção em termos de consumo de energia, representando a razão entre a energia consumida para a produção de produtos vendáveis e o consumo geral de energia do equipamento. Este indicador é obtido pela divisão entre a energia elétrica que gera valor e o consumo total de energia elétrica durante o tempo de produção teórico:

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Consumo de Energia Elétrica que Gera Valor}}{\text{Consumo Total de Energia Elétrica}} = \frac{E0}{E6} \quad (1)$$

O objetivo principal deste indicador não é mensurar a redução do consumo de energia elétrica em termos absolutos, mas sim propiciar um meio de avaliação para a utilização da energia elétrica de maneira mais eficiente, com foco na produção das unidades vendáveis. Desta forma, um indicador próximo de 1 indica que o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado majoritariamente para as atividades que geram valor.

Desta forma, pode-se também compreender as causas para um eventual aumento no consumo global de energia elétrica – E6 – em relação ao que é exigido para a produção das unidades vendáveis – E0. Para este objetivo, os autores propõem a decomposição deste indicador em múltiplos fatores de análise, conforme apresentado no Quadro 4:

Quadro 4 – Fatores de análise de energia elétrica

Fator	Descrição	Fórmula
Qualidade ($E_{quality}$)	Energia elétrica desperdiçada devido à problemas de qualidade (retrabalhos e rejeitos)	$\frac{E0}{E1}$
Saturação (E_{sat})	Energia elétrica desperdiçada devido à eventos que retardam a produção do recurso no tempo disponível para operação, tais como microparadas, ajustes e <i>setups</i> .	$\frac{E1}{E2}$
Disponibilidade (E_{avail})	Energia elétrica desperdiçada devido à indisponibilidade do equipamento – manutenção corretiva.	$\frac{E2}{E3}$
Utilização (E_{usage})	Energia elétrica desperdiçada devido ao desuso do equipamento, associado a causas relacionadas com a gestão do sistema de produção, tais como planejamento da produção, falta de encomendas externas e matérias-primas, dentre outros fatores.	$\frac{E3}{E5}$
Inicialização ($E_{opening}$)	Energia elétrica desperdiçada devido às inicializações realizadas no equipamento em períodos como o início de um dia e retorno pós finais de semana e feriados.	$\frac{E5}{E6}$

Fonte: Autor “adaptado de” May et al., 2015

Os fatores propostos possibilitam a identificação das áreas com maior potencial de atuação para o incremento da eficiência energética global do sistema, pois quanto mais distante o fator esteja do valor ideal – 1 –, maior a necessidade de uma intervenção dentro da área definida pelo pilar associado ao indicador e seus respectivos estados de manufatura. Neste caso, um valor baixo do fator "Disponibilidade" em comparação aos demais sugere a necessidade de intervenções no âmbito da manutenção e incremento da confiabilidade dos equipamentos, assim como um baixo índice do fator "Qualidade" denota um forte impacto de problemas de qualidade no desempenho energético do sistema.

Desta forma, verifica-se através do conjunto de métricas apresentado por May et al. (2015) que o desenvolvimento de indicadores de eficiência energética voltados exclusivamente às atividades de manufatura possui papel preponderante no apoio e interpretação das causas pelas quais parte do consumo de energia elétrica atribuído à produção de um item não esteja relacionada à uma atividade que gere valor ao produto final.

Adicionalmente, o desenvolvimento do método de e-KPIs permite ainda a identificação de áreas de melhoria de eficiência energética relacionadas à gestão da produção e operações, possibilitando também a geração de novos indicadores com os dados obtidos e demonstrando eventuais *trade-offs* como consequências de possíveis medidas tomadas para incremento destes indicadores.

2.4 CONSUMO E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população em adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como eletrodomésticos e eletroeletrônicos.

No entanto, fatores favoráveis relacionados a uma matriz energética majoritariamente composta por fontes renováveis podem muitas vezes criar uma falsa impressão de não haver a necessidade de utilizar os recursos naturais de forma racional, estimulando assim o desperdício e a forma irracional com que são utilizados (MANGIAPELO, 2012).

Neste panorama, o problema de suprimento não se limita apenas à necessidade de gerar cada vez mais energia elétrica, mas, primeiramente, a eliminar desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo (ELETROBRAS, 2005). Conforme pontuado por Irrek e Thomas (2006), a racionalização do uso de energia elétrica apresenta-se como alternativa de baixo custo e de curto prazo de implantação, além de impactar positivamente o meio ambiente. Sendo assim, os princípios de conservação de energia pretendem diminuir o consumo e, conseqüentemente os custos, sempre levando em consideração que não se perca a qualidade dos processos produtivos proporcionada pelo uso da energia elétrica.

Diante deste princípio, Godoi (2011) indica que a eficiência energética consiste em um conjunto de ações que resulta na diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade e da qualidade dos bens e serviços produzidos.

Frente à esta demanda, tem-se introduzido em todo o mundo uma série de leis, auditorias e certificações relacionadas à energia nas últimas décadas. Somado a estes fatores, o aumento do custo de energia tem impulsionado significativamente os consumidores à adoção de práticas de conservação e, conseqüentemente, à redução do consumo. De maneira complementar, conforme observado por Seow e Rahimifard (2011), as práticas e estratégias ambientais em empresas de manufatura mudaram ao longo das últimas duas décadas, deixando uma postura de simples cumprimento de normas e requisitos legais pela adoção de uma abordagem proativa em ser ambientalmente responsável no que diz respeito aos seus produtos e processos.

Conforme Haddad (2002), tem-se na atualidade um interessante contexto no qual se configura uma gama de oportunidades para que o aumento da eficiência energética seja

buscado de forma integrada e complementar, desde os recursos primários até a sua utilização pelo consumidor final, de forma a viabilizar a integração competitiva da economia local no cenário internacional, sendo que um modelo energético capaz de satisfazer todas as necessidades de energia da sociedade do futuro deverá garantir uma oferta de energia coerente com as necessidades de desenvolvimento com mínimo custo econômico, respeitadas as restrições sociais, ambientais e estratégicas.

Adicionalmente, o emprego da eficiência energética como instrumento de mitigação de problemas ambientais através da atualização tecnológica na produção também deve ser ampliado, visto que incorpora vantagens econômicas aos processos onde é agregada e permite contabilizar efetivas reduções nas emissões de resíduos prejudiciais à saúde humana e ao clima (HADDAD, 2002).

2.5 BARREIRAS PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Apesar do potencial observado na implementação de iniciativas de eficiência energética no setor industrial, diversos estudos já realizados apresentam a existência de barreiras para a introdução destas medidas, dentre as quais podem ser citadas a baixa prioridade deste tópico frente à alta direção e capital limitado para investimentos nesta área (EICHHAMMER, 2004), a ausência de informações para um diagnóstico adequado (SARDIANOU, 2008) e a dificuldade de mensuração dos resultados provenientes dos investimentos em eficiência energética (DECANIO; WATKINS, 1998).

Em uma análise global, Palm e Thollander (2010) diagnosticam barreiras de natureza técnica, econômica, comportamental e organizacional, tais como a falta de informação entre as empresas, desconhecimento da composição dos custos da energia, falta de influência dos gestores da energia, cultura organizacional que não reconhece a problemática socioambiental da energia e dificuldades de acesso a capital para investimento. Dyer et al. (2008) complementam este cenário, salientando a falta de especialistas em energia e de políticas pertinentes, esclarecidas e atuais, no âmbito da indústria.

No que tange à esfera nacional, estudo conduzido por CNI (2009) enumera os principais desafios e obstáculos a serem transpostos para a implementação de projetos de eficiência energética no setor industrial brasileiro. São eles:

- a) legislação desfavorável a investimentos industriais em energia;
- b) ausência ou não adequação de linhas de financiamento;
- c) competição com outras prioridades de investimento;

- d) ausência de capacitação profissional para identificação de oportunidades e gestão dos projetos que se mostrem viáveis;
- e) aversão a riscos técnicos decorrentes de novas tecnologias.

De maneira complementar, Godoi (2011) assinala também que várias barreiras ainda necessitam ser removidas para uma maior aplicação de medidas de eficiência energética no cenário nacional, entre as quais estão a carência de uma cultura proativa de eficiência; pouca circulação de informações técnicas e econômicas sobre o tema; falta de incentivos tributários e de maior alcance dos financeiros; visão exacerbada de risco técnico; pouca disponibilidade de capitais; políticas públicas pontuais, frágeis e sem a interdisciplinaridade requerida pela energia; carência de pessoal qualificado na indústria em termos de tecnologias energeticamente mais eficientes; baixo nível de participação e integração intrasetorial, com tendência ao isolamento dos profissionais da indústria; desconhecimento de regras contratuais; e baixo conteúdo tecnológico na competitividade das empresas.

Neste contexto, a identificação das barreiras aponta inúmeras oportunidades de atuação, visando tornar o mercado de eficiência energética industrial mais dinâmico. Dentre estas oportunidades de atuação, CNI (2009) indica a maior difusão de informações de financiamento e ajustes na metodologia de concessão de créditos; disponibilização de capacitação para que profissionais da indústria tornem-se aptos a identificar oportunidades de eficiência energética, transformando-as em oportunidades de ganho; estabelecimento de incentivos a projetos pilotos para demonstração de tecnologias inovadoras; revisão da legislação visando incentivar projetos industriais de geração de energia; e acesso direto da indústria a recursos de fundos de financiamento de projetos de eficiência energética.

Desta forma, pode-se verificar que ainda há muitas barreiras que limitam o avanço da eficiência energética, sendo que a superação das mesmas depende diretamente de atuação governamental e do estabelecimento de políticas públicas esclarecidas referentes ao tema.

2.6 O CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A energia elétrica é um insumo indispensável a todos os setores da sociedade, sendo que na indústria desempenha um papel preponderante. Desta forma, seu fornecimento a preços apropriados e em quantidade adequada é um fator decisivo para a competitividade de um país, assim como representa um aspecto fundamental para o desenvolvimento da economia e para o crescimento da produção industrial (FIRJAN, 2014). Neste contexto, é

essencial compreender a composição da tarifa cobrada no país e também compará-la à que é cobrada no mercado internacional. Conforme apontado por Eletrobras (2011), a compreensão da forma como é cobrada a energia elétrica e como são calculados os valores apresentados nas faturas de energia elétrica, emitidas mensalmente pelas concessionárias de energia elétrica, é fundamental para a tomada de decisão em relação a projetos de eficiência energética.

No Brasil, as unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários: Grupo A e Grupo B. O agrupamento é definido em função do nível de tensão em que são atendidos e, como consequência, em função da demanda, representada pelo somatório das cargas instaladas operando no mesmo intervalo de tempo, ou seja, a capacidade máxima que é exigida do sistema elétrico em determinado momento (ELETROBRAS, 2011).

As unidades consumidoras atendidas em tensão abaixo de 2,3 kV são classificadas no Grupo B – baixa tensão. Em geral, estão nesta classe as residências, lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais e grande parte dos edifícios comerciais, uma vez que, na sua maioria, são atendidos nas tensões de 127 ou 220 volts.

Os consumidores do Grupo B (baixa tensão) têm tarifa monômnia, isto é, são cobrados apenas pela energia que consomem.

Os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais, são classificados no Grupo A.

Os consumidores do Grupo A, no qual se enquadra o setor industrial, possuem tarifa binômnia, isto é, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Estes consumidores podem enquadrar-se em uma de três alternativas tarifárias:

- a) tarifação convencional;
- b) tarifação horo-sazonal verde;
- c) tarifação horo-sazonal azul (compulsória para consumidores atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV).

A existência de alternativas tarifárias permite aos consumidores do Grupo A selecionarem o enquadramento e valor contratual de demanda que resulte em menor despesa com energia elétrica. O Quadro 5 apresenta um resumo da composição tarifária das alternativas disponíveis aos consumidores do Grupo A:

Quadro 5 – Resumo das composições tarifárias

ESTRUTURA TARIFÁRIA CONVENCIONAL	
PREÇO:	APLICAÇÃO:
Um preço para a energia e outro para a demanda (Tarifa Binômia)	Tensão igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV;
$P_{\text{consumo}} = \text{Tarifa de Consumo} \times \text{Consumo Medido};$ $P_{\text{demanda}} = \text{Tarifa de Demanda} \times \text{Demanda Contratada}.$	Demanda inferior a 300 kW.
ESTRUTURA TARIFÁRIA HORO-SAZONAL AZUL	
PREÇO:	APLICAÇÃO:
Demanda de potência ativa (kW): a) um preço para o horário de ponta b) um preço para o horário fora da ponta Consumo de energia elétrica ativa (kWh) a) um preço para o horário de ponta b) um preço para o horário fora da ponta $P_{\text{consumo}} = \text{Tarifa de Consumo na ponta} \times \text{Consumo Medido na Ponta} + \text{Tarifa de Consumo fora de Ponta} \times \text{Consumo Medido fora de Ponta}$ $P_{\text{demanda}} = \text{Tarifa de Demanda na Ponta} \times \text{Demanda Contratada na Ponta} + \text{Tarifa de Demanda fora de Ponta} \times \text{Demanda Contratada fora de Ponta}$	Compulsória: • Tensão igual ou superior a 69 kV; • Tensão inferior a 69 kV, com demanda igual ou superior a 300 kW, desde que não tenha optado pela estrutura tarifária horo-sazonal VERDE; • Tensão inferior a 69 kV, em unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional que houver apresentado, nos últimos 11 (onze) ciclos de faturamento, 03 (três) registros consecutivos ou 06 (seis) alternados de demandas medidas iguais ou superiores a 300 kW; Opcional: • Tensão inferior a 69 kV com demanda contratada inferior a 300 kW
ESTRUTURA TARIFÁRIA HORO-SAZONAL VERDE	
PREÇO:	APLICAÇÃO:
1. Demanda de potência ativa (kW): Um único preço 2. Consumo de energia elétrica ativa (kWh): a) um preço para o horário de ponta; b) um preço para o horário fora da ponta. $P_{\text{consumo}} = \text{Tarifa de Consumo na ponta} \times \text{Consumo Medido na Ponta} + \text{Tarifa de Consumo fora de Ponta} \times \text{Consumo Medido fora de Ponta}$ $P_{\text{demanda}} = \text{Tarifa de Demanda} \times \text{Demanda Contratada}$	Opcional: • Tensão inferior a 69 kV, com manifestação formal pela opção.

Fonte: Autor “adaptado de” Bandeirante Energia, 2004

A partir de 1º de janeiro de 2015, passou também a vigorar no Brasil o Sistema de Bandeiras Tarifárias, o qual foi instituído pela Agência Nacional de Energia Elétrica através da Resolução Normativa nº. 547, de maio de 2013 (ANEEL, 2015).

O sistema de bandeiras reflete a variação do custo da geração de energia elétrica e possui três classificações: verde, amarela e vermelha. Desta forma, com a adoção deste sistema, além do custo de geração da energia elétrica que é cobrado do consumidor cativo, há também um acréscimo referente às bandeiras amarela e vermelha.

Quando a bandeira está verde, as condições hidrológicas para geração de energia elétrica são favoráveis e não há qualquer acréscimo nas contas. Se as condições são um pouco menos favoráveis, a bandeira passa a ser amarela e há uma cobrança adicional, proporcional ao consumo, na razão de R\$ 2,50 por 100 kWh. Já em condições ainda mais desfavoráveis, a bandeira fica vermelha e o adicional cobrado passa a ser proporcional ao consumo na razão de R\$ 4,50 por 100 kWh (AES ELETROPAULO, 2015). Uma visão geral deste sistema é apresentada na Figura 4:

Figura 4 – Sistema de bandeiras tarifárias

Bandeira	Condições	Custo
VERDE	CONDIÇÕES FAVORÁVEIS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA.	NÃO ACRÉSCIMO NA TARIFA *
AMARELA	CONDIÇÕES MENOS FAVORÁVEIS PARA A GERAÇÃO.	ACRÉSCIMO DE R\$0,025 PARA CADA 1 kWh (QUILOWATT-HORA)
VERMELHA	CONDIÇÕES MAIS CUSTOSAS DE GERAÇÃO.	ACRÉSCIMO DE R\$0,045 PARA CADA 1 kWh (QUILOWATT-HORA)

* ACRÉSCIMO APLICADO AO PREÇO DE ENERGIA (TE – KW/H)

Fonte: AES ELETROPAULO, 2015

O acionamento de cada bandeira tarifária é sinalizado mensalmente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de acordo com informações prestadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), conforme a capacidade de geração de energia elétrica do país. A sinalização da bandeira a ser aplicada está diretamente associada ao acionamento de usinas térmicas e seus respectivos custos variáveis, sendo que todos os consumidores cativos das distribuidoras pagam o mesmo valor, proporcional ao seu consumo, independentemente de seu grupo tarifário (ANEEL, 2015).

Em relação ao preço da energia elétrica, constata-se através da Figura 5 um constante aumento acima da inflação na tarifa industrial média nos últimos anos (ANEEL, 2014), fazendo com que a indústria brasileira tenda a perder competitividade perante a outros países (FIRJAN, 2011).

CNI (2007) enumera alguns componentes contribuintes para este cenário, entre os quais estão aumentos sucessivos nas tarifas de distribuição de energia elétrica e a elevação dos custos para incremento da capacidade de geração hidroelétrica do país. Este aumento nos custos de nova geração está atrelado, majoritariamente, a despesas para obtenção de licenciamento ambiental e condições de financiamento desfavoráveis para novos empreendimentos.

Figura 5 – Tarifa industrial média de energia elétrica no Brasil

Fonte: Autor “adaptado de” ANEEL, 2014

Adicionalmente, outro fator determinante no elevado custo da energia elétrica brasileira é o crescimento incessante e proeminente de tributos e encargos incidentes, sendo que em 2012 os consumidores cativos brasileiros arcavam com dez encargos setoriais e quatro impostos e contribuições destinados aos governos federal, municipal e estadual (ABRADEE, 2015). Embora muitas dessas obrigações tenham surgido com prazo de vigência determinado, as leis ou decretos que os definiram foram sendo modificados por novos instrumentos legais, fazendo com que estes impostos e encargos fossem perpetuados no tempo.

Conforme apresentado na Figura 6, os impostos e encargos do setor de energia elétrica alcançaram a marca de 46,33% no Brasil em 2006.

Figura 6 – Carga tributária na cadeia do setor elétrico em 2006

Fonte: SALES, 2008

No que tange à esfera internacional, estudo conduzido por FIRJAN (2015) aponta que o custo médio de energia elétrica no Brasil em maio de 2015 posiciona o país em 1º lugar no ranking de países selecionados, com a tarifa mais alta entre o grupo analisado. Este panorama comparativo é observado através da Figura 7:

Figura 7 – Comparação do custo da energia elétrica entre países selecionados

Fonte: FIRJAN, 2015

Esta análise permite verificar que, quando comparada aos demais países do BRIC, a tarifa de energia elétrica industrial brasileira é 67% maior do que a média das tarifas de China, Índia e Rússia – R\$ 324,53/MWh. A comparação com quatro de seus principais parceiros comerciais – EUA, Argentina, Alemanha e China – demonstra, igualmente, que o país possui uma tarifa de energia elétrica para indústria consideravelmente maior que o padrão internacional, seja quando comparada à média mundial, aos BRICs, aos principais países da América Latina ou aos seus principais parceiros comerciais.

Diante deste cenário, a aplicação de iniciativas de eficiência energética faz-se necessária não apenas como uma medida para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, mas, principalmente, como um conjunto de ações imprescindíveis para a redução da desvantagem competitiva existente perante a indústria mundial.

2.7 A INDÚSTRIA NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

Conforme dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2013) apresentados na Figura 8, o setor da economia brasileira que possui o maior consumo unitário de energia elétrica é o industrial.

Figura 8 – Consumo de energia elétrica por setor no Brasil

Fonte: Autor “adaptado de” EPE, 2013, p.32

Considerando-se somente o consumo industrial de energia elétrica, a atividade de metalurgia é predominante, sendo responsável por 27,2% do total consumido pelas indústrias do país. A Figura 9 apresenta a classificação das dez maiores atividades econômicas industriais, de acordo com a contribuição das mesmas para o consumo total de energia elétrica na indústria brasileira em 2013 (EPE, 2014).

Figura 9 – Dez maiores consumidores industriais de energia elétrica

Fonte: EPE, 2014, p.190

Ademais, o setor industrial caracteriza-se também por ser o principal abrigo de uma tendência que tem evoluído nos últimos anos: a autoprodução de energia elétrica. A autoprodução de energia consiste em investimentos realizados por consumidores de grande porte em usinas geradoras para suprimento próprio e venda do excedente em mercado.

Conforme dados constantes do Balanço Energético Nacional (EPE, 2013), o setor industrial foi responsável pela autoprodução de 48.882 GWh em 2012, o que corresponde à 62% do total gerado no país através desta modalidade. Dentre os setores da indústria, têm destaque nesta composição os segmentos de metalurgia, papel e celulose e alimentos e bebidas, que juntos são responsáveis por mais de 90% desta produção. A Figura 10 apresenta a composição completa da autoprodução industrial nacional de energia elétrica.

Figura 10 – Autoprodução de energia elétrica industrial por setor

Fonte: Autor “adaptado de” EPE, 2013, p.179

Estimativas do Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 (MME; EPE, 2013) indicam uma previsão de crescimento no consumo de energia elétrica pelo setor industrial de 34,8% até o ano de 2022, passando dos atuais 190,9 TWh consumidos para mais de 257 TWh. Ponderando-se que o aumento da geração para suprimento da nova demanda depende de um planejamento antecipado e execução de políticas governamentais, tornam-se fundamentais estudos e investimentos para a conservação e uso eficiente de energia neste setor, atuando também na prevenção de eventuais falhas futuras no suprimento de demanda de energia elétrica no sistema energético brasileiro (MOREIRA, 2008).

De maneira complementar, observa-se que a demanda por bens é crescente e, por consequência, a demanda por recursos naturais e energia elétrica também é maior. No entanto, considerando-se que recursos naturais e energia são finitos, novas formas de produzir mais com menos devem ser encontradas (CHRYSSOLOURIS; PAPAKOSTAS; MAVRIKIOS, 2008). Neste contexto, Bunse et al (2011) afirmam que o desenvolvimento de iniciativas de eficiência energética tornou-se um elemento crucial para a sobrevivência das empresas atuantes nos setores industriais.

2.8 SIMULAÇÃO E A APLICAÇÃO EMERGENTE DE SISTEMAS DE MANUFATURA DIGITAL

A melhoria da qualidade dos produtos, a redução de custos operacionais e a inovação tecnológica são aspectos importantes para sustentar as estratégias das organizações na disputa por mercados (PEREIRA; COSTA, 2012). No entanto, a falta de informações, a inexistência de situações análogas passadas e a complexidade associada aos problemas identificados fazem com que as organizações busquem por métodos e técnicas que as orientem na busca por novas vantagens competitivas.

Neste contexto, a simulação tem-se tornado uma ferramenta útil e poderosa à análise de sistemas, permitindo o diagnóstico de problemas e do comportamento de sistemas reais complexos sob condições específicas determinadas pelo usuário (UM; HYEONJAE; LEE, 2009).

Segundo Meyers e Stephens (2005), os recentes avanços na área computacional influenciaram a maioria das áreas de negócios e da indústria, viabilizando o uso da simulação como parte integrante no processo de planejamento e de tomada de decisão da produção e do segmento de serviços da indústria.

De acordo com Pegden, Shannon e Sadowski (1995), a simulação é o processo de projeção de um sistema real a um modelo relativo que, a partir deste, conduz experimentos a fim de entender seu comportamento e avaliar estratégias de operação. Desta forma, é possível importar a realidade para um ambiente controlado, onde se pode estudar o seu comportamento sob diversas condições, sem riscos físicos ou grandes custos envolvidos (FREITAS FILHO, 2008).

Através da utilização de um modelo de simulação, os fluxos de processo de fabricação podem ser facilmente alterados para diferentes produtos e o modelo pode ser expandido para incluir novos produtos ou variações do processo, como dimensionamento de lotes, agendamento de períodos de produção e tempos de espera (SEOW; RAHIMIFARD, 2011). Meyers e Stephens (2005) acrescentam ainda que o uso da simulação por computador não é limitado apenas ao ambiente de produção, estendendo-se a outras áreas como saúde, políticas públicas etc., que também sofrem pressão para a redução de custos e pela oferta de melhores serviços.

A simulação pode também ser utilizada para justificar ações, operações e auxiliar nas decisões gerenciais. Assumindo-se que um modelo de simulação para um sistema dado é válido, o conceito lógico do modelo se assemelha com o sistema real em estudo

(MAGABLEH, 2007). De forma geral, a simulação e a modelagem podem ser consideradas técnicas integradas, sendo necessário o desenvolvimento de um modelo para posteriormente simulá-lo (ÖREN, 2010).

2.8.1 Definição de modelo

Segundo Pidd (1998), dentre as diversas definições existentes de modelo, uma visão mais elaborada o conceitua como uma representação da realidade projetada para algum propósito definido. Conforme apontado por Shannon (1998), a principal utilidade de um modelo é resumir o funcionamento de um sistema em um pequeno número de variáveis que permita a sua compreensão pelo intelecto humano, sendo que para se construir modelos e empregá-los para prever e explicar fenômenos com alto grau de precisão é necessária uma seleção correta das variáveis mais significativas que descrevem o comportamento do sistema.

De acordo com Banks et al. (2004), um modelo pode ser classificado majoritariamente em:

- a) estático ou dinâmico: um modelo estático representa um sistema em um ponto pré-determinado no tempo ou no qual o tempo não desempenha um papel preponderante em seu comportamento. Um modelo dinâmico representa um sistema que evolui ao longo do tempo;
- b) discreto ou contínuo: um modelo discreto sofre mudanças em intervalos definidos e específicos de tempo. Em um modelo contínuo, o comportamento ininterrupto de mudanças pode ser representado;
- c) determinístico ou estocástico: em um modelo determinístico os dados são considerados sem variabilidade estatística associada ao modelo. Em um modelo estocástico, os efeitos da aleatoriedade dos dados são considerados no desenvolvimento do modelo;
- d) analítico ou simulação: um modelo analítico é formado por uma série de equações matemáticas, através das quais o comportamento do sistema pode ser obtido pela atribuição de valores aos parâmetros e pela solução de equações. Um modelo de simulação possui uma estrutura matemática/lógica, que pode ser exercitada de forma a mimetizar o comportamento do sistema.

2.8.2 Simulação computacional

A simulação, dentre diversas definições, pode ser conceituada como o processo de elaboração do modelo de um sistema e a posterior condução de experimentos com a finalidade de entender o seu comportamento ou avaliar a sua operação (SHANNON, 1998).

De acordo com Freitas Filho (2008), a simulação computacional de sistemas consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de operações ou processos do mundo real. De maneira complementar, Law e Kelton (2000) informam que a simulação é utilizada devido a seu baixo custo, maior segurança e rapidez em comparação com a realização de experimentações reais.

Conforme aponta Pontes (2012), a simulação é um método experimental que, posto em prática, procura descrever os comportamentos do sistema, construir teorias ou hipóteses que sejam responsáveis pela observação do comportamento e predizer os efeitos produzidos pelas mudanças em um sistema ou em seu método de operação. Em uma simulação, o modelo representa o objeto de estudo, enquanto a simulação é uma ferramenta de análise e projeção (BARRÔNIO, 2000).

Harrel, Ghosh e Bowden (2004) afirmam que o uso da simulação computacional para aplicações comerciais iniciou-se nos anos 60, sendo que os modelos iniciais eram programados geralmente em FORTRAN e consistiam, frequentemente, em milhares de linhas de código. As simulações longas eram realizadas em computadores que possuíam uma unidade central e nos quais o custo de utilização era extremamente elevado.

A partir da década de 80 a simulação computacional tem sido amplamente utilizada tanto no meio acadêmico quanto no empresarial, graças ao aumento da popularidade e da capacidade dos computadores (KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 1998). Assim, passaram a existir várias novas maneiras de se desenvolver um modelo computacional, incluindo-se desde as linguagens de alto nível até planilhas ou aplicativos de software, sendo que diversos simuladores de fácil utilização e acompanhados de animação gráfica dinâmica do sistema estão disponíveis no mercado (ALEXANDER, 2006).

Conforme observado por Freitas Filho (2008), a simulação permite que sejam realizados estudos em sistemas que ainda não existem, levando ao desenvolvimento de projetos eficientes antes que qualquer intervenção física tenha sido iniciada.

Bertrand e Fransoo (2002) afirmam ainda que, apesar da qualidade científica dos resultados da simulação ser menor que a análise matemática, sua relevância é alta. Neste

contexto, Pereira e Costa (2012) ilustram a capilaridade da aplicação da simulação computacional, apresentando iniciativas baseadas nesta técnica em diversos segmentos, tais como o hospitalar (WANG et al., 2010), o aeroportuário (MEDAU, 2011), o sucroalcooleiro (IANNONI; MORABITO, 2002; SILVA, 2006), o agropecuário (COSTA, 2004), o de transporte (WEI; LEUNG, 2011) e, majoritariamente, o de manufatura (WY et al., 2011).

Banks et al. (2004) e Freitas Filho (2008) enumeram algumas das principais vantagens da aplicação da técnica de simulação:

- a) modelos mais realistas: a simulação não obriga o enquadramento de um problema em determinado tipo de modelo padrão para que se possa obter uma solução;
- b) processo de modelagem evolutivo: pode-se iniciar com um modelo relativamente simples e, a partir da identificação das peculiaridades do problema, aumentar a sua complexidade;
- c) grande flexibilidade e versatilidade: aplica-se aos mais variados problemas;
- d) aquisição de visão sistêmica: visão do efeito que alterações locais terão sobre o desempenho global de todo o sistema;
- e) exploração de possibilidades: permite testar várias alternativas para a situação atual sem interferir na realidade, poupando tempo e evitando a implantação de alternativas avaliadas de forma insuficiente;
- f) tempo de execução resumido: permite a observação de alternativas simuladas em longo prazo.

De acordo com Pidd (1998), a aplicação da simulação é recomendável para sistemas ou ambientes dinâmicos, interativos e complexos, os quais necessitam ter sua dinâmica considerada e analisada, porém não podem ser facilmente estudados através de métodos analíticos. Entretanto, Banks et al. (2004) e Freitas Filho (2008) salientam que a programação de um modelo de simulação pode se tornar altamente dispendiosa e desgastante caso os recursos não sejam apropriados ou os resultados obtidos não sejam adequadamente interpretados.

Desta forma, a técnica de simulação é considerada muito útil ao oferecer segurança na minimização de riscos e custos com diversos recursos e ações (SHANNON, 1998). No entanto, ela não é uma ferramenta que substitui o trabalho de interpretação humano (DUARTE, 2003), pois ao investigar uma dada situação problema com alta variabilidade das variáveis, gera resultados que demandam interpretações mais profundas e abrangentes (PAUL; KULJIS, 2010).

2.8.3 Ferramentas de simulação

O desenvolvimento de um ambiente de simulação demanda um programa computacional, o qual representa uma sequência definida de operações necessárias para que o programador possa descrever um modelo do sistema. Este programa utiliza-se de um computador para executar o modelo, de forma a gerar saídas que possam ser analisadas e a fim de que decisões possam ser tomadas (PONTES, 2012).

Robinson (2005) destaca a evolução dos simuladores computacionais, ocorrida a partir do final da década de 1950, período no qual as simulações foram desenvolvidas em código de máquina apoderando-se da oportunidade oferecida pela primeira geração de computadores. Através da utilização de uma linguagem de propósito geral, um programa especial era escrito para a simulação de cada sistema a ser estudado, oferecendo ao programador a máxima flexibilidade em projeto e formulação do modelo matemático do sistema em estudo, tipo e formato de dados de saída gerados e espécies de experiências de simulação executadas com o modelo.

A partir deste ponto, a introdução de linguagens de programação e computadores mais poderosos e confiáveis na década de 1960 aprimorou substancialmente o potencial para o desenvolvimento de simulações. Foram realizados progressos significativos tanto na metodologia de simulação, como a sistemática apresentada por Tocher (1967), quanto no desenvolvimento de linguagens especialistas de simulação, como o GPSS. Diversas novas linguagens foram desenvolvidas na década de 1970, a qual vivenciou também o surgimento dos primeiros microcomputadores.

De acordo com Law e Kelton (2000), linguagens especialistas de simulação são pacotes computacionais de natureza genérica, porém, com características especiais para determinados tipos de aplicações em simulação. Assim como nas linguagens de programação, as linguagens de simulação também fazem uso de compiladores, mas são aplicadas especificamente em simulação, possuindo bibliotecas pré-programadas compostas por macros de linguagens de programação.

Até os anos 1980, a aplicação comercial da simulação foi limitada, devido à necessidade de hardware de custo elevado e habilidades de computação especializadas. No entanto, esta década apresentou uma revolução neste cenário, sendo marcada pela popularização dos microcomputadores nas organizações e pelo desenvolvimento de pacotes de software com recursos de simulação interativa visual (VIS), os quais aplicavam princípios de animação e de representação interativa das instalações simuladas. Dentre os pacotes de

simulação surgidos nesta década estão o SIMAN/CINEMA[®] – atual Arena[®] – e o ProModel[®]. Segundo Law e Kelton (2000), pacotes de simulação ou simuladores são pacotes computacionais que favorecem a modelagem de sistemas específicos com pouca programação. As vantagens dos simuladores estão associadas ao tempo reduzido para construção do modelo e à facilidade de utilização com menus gráficos relacionados com o sistema específico. Muitas organizações, em particular no setor da indústria de transformação, passaram a utilizar a simulação como uma ferramenta de suporte à decisão, embora a adoção ainda fosse irregular e não generalizada (ROBINSON, 2005).

Após a revolução observada na década de 1980, os anos 1990 representaram um período de contínua evolução, porém sem apresentar mudanças drásticas. As principais áreas de desenvolvimento ocorreram na aplicação de modelagem visual-interativa, disponibilização de ferramentas integradas para otimização da simulação, utilização de princípios de realidade virtual, integração com outros softwares e uso da simulação no setor de serviços (ROBINSON, 2005).

A partir da década de 2000, em um cenário onde a inovação e a otimização contínua dos processos de produção tornaram-se fatores decisivos, tem-se destacado o desenvolvimento e a aplicação de sistemas integrados de simulação, chamados de sistemas de manufatura digital. As soluções de manufatura digital englobam, em geral, diversas aplicações de simulação como *layout* de plantas, linhas de produção, células de manufatura, dispositivos de automação e fluxo de materiais, simulação humana e processos diversos, e ainda permitem criar modelos exatos de máquinas CNC, robôs, transportadores e todo um ambiente industrial para análise e otimização, minimizando assim a curva de aprendizado e simulando todos os testes de fabricação no computador.

A Figura 11 apresenta uma visão geral da evolução das ferramentas de simulação e sua respectiva relação com a redução do tempo de programação e execução requeridos. Estas ferramentas continuam em processo de contínua evolução, tornando-se mais flexíveis, simples de utilizar, com melhores recursos visuais e interação com o usuário aprimorada.

Figura 11 – Evolução das ferramentas de simulação

Fonte: Autor “adaptado de” Pontes, 2012

2.8.4 Sistemas de manufatura digital

O aumento da concorrência, a globalização e a complexidade dos produtos levam os fabricantes a reduzir os custos e melhorar continuamente a produtividade para competir em um mercado global. Ao mesmo tempo, é necessária agilidade para responder rapidamente às demandas dos clientes e aproveitar as oportunidades de mercado que possam surgir. Diante deste cenário, no qual a viabilidade de um empreendimento é determinada pela eficiência da capacidade de seus processos de manufatura, ambientes virtuais de simulação podem colaborar diretamente na análise e no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, propiciando assim melhores tomadas de decisão. Através deste princípio destaca-se o surgimento do conceito de manufatura digital – conhecido mundialmente como *Digital Manufacturing* –, o qual é parte da abordagem PLM que integra as informações do ciclo de vida de produtos ao ambiente de negócios das corporações (GAMA; COSTA, 2009).

Em um panorama no qual é crescente o número de empresas de todos os portes que investem em iniciativas de tecnologia de informação como forma de melhorar seus negócios, Chryssolouris et al. (2009) afirmam que enquanto muitas abordagens buscam soluções para áreas bem delimitadas de negócios, a Manufatura Digital é uma das poucas alternativas com potencial para transformar os negócios, tornando-os mais competitivos. A fábrica digital aparece, neste contexto, como uma inovação de TI que busca aprimorar os processos de desenvolvimento do produto pela introdução de novos processos e softwares que proporcionam maior colaboração com o desenvolvimento dos processos de manufatura (DE CARLI; DELAMARO; SALOMON, 2010).

Para Kuehn (2006), a fábrica digital é um conceito que possui caráter de integração, melhorando produtos e processos de engenharia de produção. A simulação é a tecnologia-chave deste conceito, em que diferentes tipos de simulação, como eventos discretos ou simulação animada em três dimensões, podem ser aplicados em modelos virtuais para várias tarefas e estágios de planejamento, com o objetivo de melhorar os produtos e o planejamento dos processos em todos os níveis. Produtos, processos e recursos são testados em uma fábrica virtual para, quando livres de erros, serem utilizados na fábrica real (KUEHN, 2006).

Neste contexto, sistemas de manufatura digital contemplam modelos, métodos e ferramentas para o apoio sustentável das etapas de planejamento e operação de instalações fabris (WENZEL; JESSEN; BERNHARD, 2005), incorporando tecnologias para a representação virtual e integração de fábricas, recursos, equipamentos, conhecimento, bem como para uma maior integração entre o desenvolvimento de produtos e seus respectivos processos através da modelagem e simulação (CHRYSSOLOURIS et al., 2009).

A manufatura digital utiliza um ambiente virtual dinâmico de simulação com representação de modelos e apresenta um conjunto de ferramentas que integram o projeto do produto aos processos de manufatura (GAMA, 2013). De maneira complementar, utiliza dados da estrutura de materiais de engenharia, *Engineering Bill of Materials* (EBOM), para criar a estrutura de materiais de produção, *Manufacturing Bill of Materials* (MBOM) e a estrutura de processos, *Bill of Processes* (BOP). Estas estruturas, combinadas ao gerenciamento dos recursos produtivos – tais como ferramentas, máquinas, centros de trabalho, operadores humanos e robôs –, geram dados agrupados em produtos, processos e recursos da planta produtiva, que são criados e mantidos em um repositório central de dados (DE CARLI; DELAMARO; SALOMON, 2010).

Conforme Slansky (2006), assim como as ferramentas de modelo digital – *digital mock-up* – permitem aos engenheiros desenvolver modelos virtuais do produto, as ferramentas de manufatura digital permitem aos engenheiros de manufatura visualizar a operação dos processos produtivos. Desta forma, muitos erros de projeto são evitados e melhorias no produto são feitas através da simulação. Adicionalmente, tempo considerável e mão-de-obra são reduzidos pela eliminação dos protótipos físicos requeridos para a validação de projetos de produtos.

De acordo com De Carli, Delamaro e Salomon (2010), a manufatura digital integra os seguintes processos:

- a) desenvolvimento, teste e otimização do produto;
- b) desenvolvimento e otimização dos processos de produção;

- c) projeto e melhoria da planta;
- d) planejamento e controle das operações produtivas.

Gama e Costa (2009) afirmam ainda que a manufatura digital, como integrante da abordagem PLM, apoia principalmente as áreas da engenharia de processos, desenvolvimento de produtos e logística, se preocupando com a máxima eficiência dos recursos de produção e utilização da fábrica, melhores práticas e otimização de investimentos. Neste contexto, a abordagem PLM proporciona todo o processo de gerenciamento do ciclo de vida de um produto, desde sua concepção, atravessando as fases de projeto, manufatura, manutenção e descarte desse produto.

O PLM integra pessoas, dados, processos e sistemas de negócios e oferece uma estrutura centralizada de informações do produto de forma colaborativa dentro do conceito de empresa estendida, ou seja, inclui a própria empresa, clientes, parceiros e fornecedores. A abordagem PLM é considerada como um dos marcos da estrutura da tecnologia de informação de uma corporação moderna e vem conquistando cada vez mais o nível executivo das empresas (GAMA; COSTA, 2009). De acordo com Cáceres, Castilho e Rosário (2011), a visão apresentada no PLM permite antever a necessidade de um ambiente de gestão, incluindo processos, aquisição de dados e possibilidades de utilização de recursos de toda a empresa, evitando assim revisões na fábrica ou da infraestrutura de uma organização e conferindo flexibilidade e agilidade às empresas para responder de maneira eficiente e efetiva às mudanças, aos novos mercados e à concorrência.

Cáceres, Castilho e Rosário (2011) afirmam ainda que a Manufatura Digital representa um marco importante na evolução do PLM, agregando um conjunto de softwares integrados que permitem aos planejadores de manufatura validar seus processos, aprimorar e sincronizar a produção ao longo de toda a cadeia produtiva, sendo também passíveis de simulação aspectos de ergonomia e movimentação dos operadores humanos na linha produtiva.

Grieves (2006) define também a manufatura digital como uma abordagem que envolve pessoas, processos, práticas e tecnologia, a qual utiliza as informações do PLM para planejar, projetar e fabricar o primeiro exemplar de um produto; fazer o *ramp up* deste produto para produção em volume, período no qual as questões de escala aparecem; e produzir o volume restante dos produtos, que significa entrar em nível contínuo de produção considerando-se a quantidade mínima necessária de recursos possível.

Gama (2011) conceitua ainda sistemas de Manufatura Digital como um conjunto abrangente de ferramentas interdisciplinares que afetam diretamente os processos de negócios

das empresas de manufatura, influenciando e propiciando, de uma forma direta, a engenharia colaborativa e os processos de tomadas de decisão em ambientes PLM. De maneira geral, os sistemas de Manufatura Digital se estruturam a partir de diversas ferramentas de software para concepção, simulação e análise de manufatura (*CAD-Computer Aided Design*; *CAE-Computer Aided Engineering*; *CAM-Computer Aided Manufacturing*; *CAT-Computer Aided Testing*). Além destas ferramentas, voltadas para o produto, são também utilizadas ferramentas para análise de ergonomia, concepção e simulação de linhas de produção e seu respectivo desempenho, sendo o resultado do uso destas ferramentas gerenciado pela plataforma PLM (CÁCERES; CASTILHO; ROSÁRIO, 2011).

No que tange o foco das práticas industriais, Chrysosolouris et al. (2009) afirmam de maneira resumida que a manufatura digital tem seu objetivo no emprego de consistentes e abrangentes métodos digitais de planejamento e validação através de computador, envolvendo desde o desenvolvimento do produto até o planejamento da produção e instalações. Os mesmos autores informam também que a manufatura digital possui a capacidade de:

- a) reduzir o tempo e custo de desenvolvimento;
- b) integrar o conhecimento de diferentes departamentos e processos de manufatura;
- c) integrar a manufatura descentralizada em função da crescente diversidade de produtos e partes produzidos em diferentes plantas;
- d) focar as empresas de manufatura em seus objetivos, visando trabalhar com eficiência na sua rede de fornecedores e colaboradores em um processo de engenharia colaborativa que tem como base a tecnologia da informação.

Segundo Gama e Costa (2009), a manufatura digital proporciona ainda menor tempo de liberação de produtos para o mercado, menor tempo de fabricação, menor tempo para se alcançar escala de produção e ainda estimula a inovação de produtos e de processos. Grieves (2006), complementa também que, como parte do PLM, a manufatura digital permite eliminar o desperdício e maximizar a eficiência em todos os aspectos da vida do produto, desde as fases de projeto até a distribuição, não se limitando apenas às etapas de manufatura.

2.8.5 Aplicação de simulação em iniciativas de eficiência energética

A simulação de eventos discretos é frequentemente utilizada na fase de projeto para avaliar conceitos e aperfeiçoar soluções de sistema antes que as decisões de investimento sejam feitas. O objetivo comum é identificar áreas problemáticas e quantificar ou aprimorar o

desempenho do sistema de produção, tais como o rendimento sob cargas média e de pico, utilização de recursos, mão de obra e máquinas, necessidades de pessoal, turnos de trabalho, pontos de estrangulamento e necessidades de armazenamento de manuseio de materiais (HEILALA et al., 2008).

Conforme apontado por Herrmann et al. (2011), normalmente há três paradigmas diferentes relacionados à modelagem e simulação de energia elétrica em sistemas de produção. A Figura 12 apresenta estes paradigmas, no qual três diferentes cenários que envolvem a utilização de ferramentas convencionais de simulação de eventos discretos – DES – são observados:

Figura 12 – Paradigmas de simulação de energia elétrica em sistemas de manufatura

Fonte: Herrmann et al., 2011

- a) paradigma A – ferramentas de simulação de eventos discretos (DES) são utilizadas para simular sistemas de produção e suas variáveis típicas, como o estado dos equipamentos e o tempo de produção. Esta informação é posteriormente transportada para uma ferramenta de avaliação externa, na qual os dados de simulação obtidos são convertidos em variáveis relacionadas à energia elétrica, como o consumo em kWh;
- b) paradigma B – apresenta a integração dinâmica de ferramentas distintas – DES e avaliação –, permitindo a consideração das interdependências existentes entre os diferentes sistemas;
- c) paradigma C – todas as características relevantes para a obtenção de dados de energia elétrica e avaliação dos mesmos estão implementadas em apenas uma ferramenta – DES.

De maneira complementar, Thiede et al. (2013) assinalam que o uso da simulação de sistemas de manufatura é um caminho promissor para o endereçamento das novas questões relacionadas ao meio ambiente, como o consumo de energia elétrica, haja vista as considera simultaneamente com outras dimensões tradicionais de análise, como custo, tempo e qualidade. Os autores afirmam ainda que o uso de modelos teóricos para o estabelecimento de uma linha de base de energia elétrica é útil na identificação de oportunidades de aprimoramento no uso de energia. No entanto, para que isto seja viável, as ferramentas aplicadas necessitam ser integradas e flexíveis, sendo capazes de modelar e simular diferentes situações de produção e cenários de utilização de energia elétrica, identificando áreas potenciais para melhorias e permitindo a modelagem de diversos cenários para apoiar decisões de investimento (THIEDE et al., 2013).

Estudos iniciais utilizando-se destas ferramentas para análise de eficiência energética em instalações industriais foram conduzidos por Solding e Thollander (2006) e Solding e Petku (2005), os quais apresentam modelos de simulação para análise e redução do consumo de energia elétrica com foco em fundições e suas respectivas características específicas.

Adicionalmente a esta iniciativa, Ghani, Monfared e Harrison (2012) propõem um modelo de simulação que objetiva a redução do consumo de energia elétrica de uma máquina para a indústria automobilística, durante as fases de concepção da mesma. Através da simulação proposta pelos autores pode-se identificar os componentes de consumo intensivo de energia enquanto a máquina está em estado de ociosidade, propiciando assim uma alteração de projeto no sistema de automação do equipamento a qual resultou em redução de 3,2% do consumo total de energia elétrica.

Estudo conduzido por Kohl, Spreng e Franke (2014) apresentou também um modelo de simulação de uma linha de produção, combinando fluxo de materiais e variáveis de energia elétrica, tendo como resultado a previsão do consumo de energia individual por variante de produto produzida, assim como os respectivos custos atrelados.

Além da redução de consumo, trabalhos acadêmicos recentes têm focado também na utilização de ferramentas de simulação para explorar a redução da demanda elétrica de sistemas de manufatura nos horários de ponta.

Fernandez, Li e Sun (2013), Sun et al. (2014) e Bego, Li e Sun (2014) apresentam modelos de aplicação de *buffers* voltados apenas à redução da demanda elétrica durante os horários de ponta em sistemas multimáquinas, através da construção de estoques intermediários entre as máquinas e alterações no planejamento da produção durante os períodos fora de pico. Modelos matemáticos foram elaborados a partir do método de

programação não linear com o objetivo de minimizar o custo total de operação do sistema, sendo os parâmetros obtidos testados através de modelos de simulação discreta do sistema de manufatura analisado, permitindo assim a obtenção de um comparativo dos resultados de produção e demanda elétrica para os diferentes cenários propostos.

No entanto, além dos sistemas de produção tratados por estas ferramentas e estudos já realizados, a disposição física das unidades fabris, o comportamento dinâmico dos equipamentos, bem como o dimensionamento e os diferentes estados de manufatura que um recurso produtivo pode assumir durante sua operação, entre outros fatores, podem ter um grande impacto sobre o consumo de energia elétrica nas unidades fabris. Desta forma, a aplicação de ferramentas integradas de manufatura digital permite uma análise mais eficiente e global de sistemas de produção, adicionando novos parâmetros a serem tratados simultaneamente.

Ademais, conforme colocado por May et al. (2015), ferramentas de simulação podem também ser utilizadas em um amplo campo ainda pouco explorado, a fim de estudar o comportamento energético dos recursos produtivos frente a diferentes cenários, possibilitando a obtenção de previsões do consumo de energia elétrica e fornecendo informações pertinentes para o processo de tomada de decisão, como a escolha do melhor contrato de fornecimento e os turnos ideais para a operação de uma planta. Estes cenários podem envolver os efeitos obtidos através da aplicação de diferentes instrumentos, tais como o relacionamento entre os estados de energia e os estados de manufatura das máquinas, a gestão de estoques e *buffers* e o planejamento da produção (MAY et al., 2015).

De maneira complementar, os autores informam ainda que ambientes de simulação, quando apoiados adequadamente por indicadores de desempenho, permitem não apenas a avaliação de diferentes cenários, mas também o acompanhamento da eficácia das ações de melhoria tomadas ao longo do tempo.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ABORDADO E PROCEDIMENTOS DO ESTUDO

Os sistemas de produção modernos são dinâmicos e complexos, apresentando invariavelmente cenários de interdependência entre diferentes máquinas e interações entre suas operações internas individuais. No entanto, diversos fatores como paradas não planejadas, quebras e outros distúrbios individuais não previstos afetam de maneira global o funcionamento desses sistemas e impedem que os mesmos atinjam o grau de eficiência projetado.

Conforme observado por Chang et al. (2013), a eficiência energética dos sistemas de produção em ambientes de fabricação reais é surpreendentemente baixa. Estudos anteriormente conduzidos demonstram que quantidades significativas de energia elétrica são desperdiçadas devido a práticas habituais na indústria, tais como manter uma máquina que não faz parte do gargalo de produção ligada, em estado operacional, devido à ausência de múltiplos estados de operação (CHANG et al., 2013).

Diante deste contexto, o presente trabalho apresenta a geração de diferentes cenários de simulação para a identificação de oportunidades de melhor aproveitamento dos recursos de energia elétrica consumidos em uma linha de produção em série de uma indústria automobilística.

Os indicadores de eficiência energética propostos por May et al. (2015) são utilizados como referência para avaliação e justificativa das ações deliberadas neste estudo. Ademais, comparativos considerando-se o consumo de energia elétrica e o respectivo número de peças produzidas – *throughput* – para os cenários simulados são também apresentados, visando-se justificar os riscos e ilustrar os benefícios das estratégias propostas.

3.1 SELEÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO A SER ANALISADO

O presente projeto destina-se a mensurar o consumo de energia elétrica em sistemas de produção discretos. Neste aspecto, foi selecionada como base para este estudo a linha de produção apresentada por Chang et al. (2013), a qual é responsável pela manufatura de blocos de motores em uma indústria automobilística.

Esta linha é composta por dezenove estações de trabalho e quatro *buffers*, cada um com capacidade de armazenamento para 100 peças. Uma representação simplificada desta linha é apresentada na Figura 13:

Figura 13 – Segmento de linha considerado para estudo

Fonte: Autor “adaptado de” Chang et al., 2013

Todas as estações de trabalho são interligadas em série por transportadores, sendo que as estações M12A e M12B são paralelas. O segmento de linha considerado está também interligado com outras seções da planta, as quais não são alvos deste estudo.

Os parâmetros de produção desta linha de motores foram também retirados do estudo apresentado por Chang et al. (2013) e são exibidos na Tabela 1. Estes dados foram obtidos pelos autores em uma linha de produção de motores real, sendo apenas adaptados através de uma escala devido a exigências de confidencialidade. Os parâmetros apresentados incluem o tempo de ciclo, a disponibilidade e o tempo médio de reparo (MTTR) para cada uma das estações de trabalho, considerando-se a produção de apenas um modelo de motor nesta linha. Os valores de disponibilidade dos equipamentos foram adotados, utilizando-se como referência os índices de tempo médio entre falhas (MTBF) expostos por Chang et al. (2013) para esta linha, assim como os resultados de disponibilidade para máquinas de usinagem apresentados pelo estudo de Fagundes et al. (2011).

A escolha de uma linha com operação aproximadamente sincronizada decai sobre a relevância de se buscar oportunidades de melhoria de eficiência energética, mesmo em sistemas de produção já bem concebidos originalmente.

Tabela 1 – Parâmetros de produção

Estação	Tempo de ciclo (s)	Disponibilidade (%)	MTTR (min)
M1	29,35	94,49	21,82
M2	24,43	96,24	34,07
M3	29,27	96,15	68,37
M4	28,94	95,53	46,65
M5	28,11	96,26	34,25
M6	28,99	95,93	41,8
M7	28,61	96,15	39,62
M8	28,4	95,81	34,48
M9	29,98	95,05	34,35
M10	28,37	97,90	58,12
M11	26,78	96,07	16,28
M12A	57,8	94,73	18,28
M12B	58,5	94,05	15,85
M13	30	95,88	27,42
M14	27,25	95,95	20,12
M15	30,81	94,81	12,62
M16	27,85	96,88	95,13
M17	28,98	96,61	59,17
M18	28	97,60	17,2

Fonte: Autor “adaptado de” Chang et al. (2013)

Para o correto estabelecimento das relações entre os estados de manufatura e o gerenciamento de energia elétrica da linha em estudo, faz-se também necessária a identificação dos estados possíveis de energia a serem assumidos pelos equipamentos, assim como suas respectivas potências.

Neste aspecto, os estados de energia considerados neste estudo seguem a proposta de May et al. (2015), detalhada no capítulo 2.3, que propõem os seguintes níveis de operação para equipamentos de manufatura: desligado, em desenergização, *standby*, manutenção, operacional, *setup*, em energização e processamento. O estado de *setup* não será considerado neste estudo. Os estados de energização e desenergização não possuem valores próprios de potência associados, sendo seus consumos resultantes dos respectivos tempos de transição com o equipamento em nível de energia operacional. Os tempos de transição para os estados supracitados foram adotados pelo autor.

Os tempos de transição entre o estado operacional e os estados de manutenção e processamento são considerados desprezíveis, não sendo adotados neste estudo. Este posicionamento deve-se à dimensão consideravelmente reduzida destes tempos em relação às demais variáveis presentes neste estudo, não interferindo assim nos resultados finais obtidos. O Quadro 6 apresenta a descrição dos estados de energia previstos para a linha em análise:

Quadro 6 – Estados de energia da linha analisada

Estado de energia	Descrição
Desligado	Equipamento está desligado: nenhum consumo de energia elétrica é requerido.
<i>Standby</i>	Equipamento apresenta a maioria dos componentes desligados e não está pronto para processar peças. Apenas alguns componentes são mantidos ativos e consomem energia elétrica, a fim de reduzir o tempo de reativação do equipamento.
Manutenção	Equipamento está sendo reparado, com algumas ações específicas que necessitam de energia elétrica.
Operacional	Equipamento não está processando peças, porém mantém energizados todos os componentes necessários para voltar a produzir imediatamente caso solicitado.
Processamento	Equipamento está processando peças.

Fonte: Autor “adaptado de” May et al. (2015)

O diagrama de estados de energia das máquinas, suas respectivas transições e tempos associados são apresentados na Figura 14:

Figura 14 – Diagrama de estados de energia

Fonte: Autor

De acordo com Chang et al. (2013), para esta linha de usinagem de alta velocidade, o consumo de energia elétrica em modo operacional representa cerca de 60% do consumo no modo de processamento, pois os fusos de todas as máquinas permanecem em alta velocidade nesta situação. Os mesmos autores citam ainda que, ao possibilitar a inserção de um modo de espera nestes equipamentos – *standby* –, o consumo de energia elétrica cairia para 10% do consumo verificado no modo de processamento.

Através destes dados e das informações de potências de máquinas estabelecidas através dos estudos de Fernandez, Li e Sun (2013), Sun et al. (2014) e Bego, Li e Sun (2014),

foram assumidos os valores para cada estado de energia dos equipamentos que compõem a linha, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros de energia elétrica dos equipamentos da linha

Estação	Processamento (kW)	Operacional (kW)	Manutenção (kW)	Standby (kW)
M1	14	8,4	3,5	1,4
M2	24	14,4	6	2,4
M3	14	8,4	3,5	1,4
M4	15	9	3,75	1,5
M5	25	15	6,25	2,5
M6	25	15	6,25	2,5
M7	13	7,8	3,25	1,3
M8	15	9	3,75	1,5
M9	12	7,2	3	1,2
M10	14	8,4	3,5	1,4
M11	21	12,6	5,25	2,1
M12A	24	14,4	6	2,4
M12B	24	14,4	6	2,4
M13	14	8,4	3,5	1,4
M14	20	12	5	2
M15	12	7,2	3	1,2
M16	14	8,4	3,5	1,4
M17	14	8,4	3,5	1,4
M18	15	9	3,75	1,5

Fonte: Autor

Para todos os equipamentos envolvidos, a potência nominal considerada para o estado desligado é 0 kW. As potências das máquinas para o estado de manutenção foram assumidas pelo autor, de acordo com analogia ao consumo de energia elétrica apresentado para o estado de *setup* por Abele, Panten e Menz (2015), o qual representa cerca de 25% da potência do equipamento em modo de processamento.

3.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O software de simulação utilizado neste estudo é o *Plant Simulation*[®], parte da suíte de aplicativos Tecnomatix[®], da Siemens.

A suíte Tecnomatix[®] é um portfólio abrangente de soluções de manufatura digital que integra as disciplinas de produção com a engenharia de produtos, incluindo engenharia de processo e simulação e gerenciamento da produção. O Tecnomatix é parte da plataforma de PLM Siemens, a qual é dividida nos seguintes grupos:

- a) *part planning and validation*: estabelecimento do plano de produção de peças e conexão dos planos de manufatura à produção. Composto pelas ferramentas *Part Manufacturing Planner*, *Machining Line Planner*, *Press Line Simulation* e *Virtual Machine Tool*;
- b) *assembly planning and validation*: projeto e avaliação virtual dos cenários de processos de manufatura. Envolve o desenvolvimento e sequenciamento do processo, gerenciamento da lista de materiais para produção, ajuste da linha de produção, gerenciamento de tempo, análise do *layout* da fábrica e ergonomia. Composto pelas ferramentas *Process Designer*, *Process Planner*, *Process Simulate Assembly*, *Process Simulate Human* e *Jack*;
- c) *robotics and automation planning*: desenvolvimento e simulação virtual de sistemas robóticos e sistemas de manufatura automatizados. Utiliza a tecnologia de simulação com base em sinais, visando permitir a preparação virtual de sistemas de produção e minimizar a dependência de testes físicos ao depurá-los. Composto pelas ferramentas *Process Designer*, *Process Simulate Robotics*, *Robcad* e *Process Simulate Spot Weld*;
- d) *plant design and optimization*: desenvolvimento de modelos de fábrica, modelagem de processos de manufatura e simulação do desempenho de sistemas integrados, visando propiciar operações mais eficientes. Composto pelas ferramentas *Factory Cad*, *Factory Flow* e *Plant Simulation*;
- e) *quality and production management*: monitoração do trabalho em andamento, controle das operações e da mão-de-obra em tempo real, carregando as informações de produção nos sistemas de negócios e nos repositórios de ciclo de vida, incluindo o gerenciamento de qualidade. Composto pelas ferramentas e tecnologias *Dimensional Planning and Validation (DPV)*, *Variation Analysis (VSA)*, *CMM Inspection*, *Manufacturing Execution Systems (MES)* e *HMI/SCADA*.

Ambiente de simulação selecionado para a construção do modelo e execução das simulações alvo deste trabalho, o software *Plant Simulation*[®] é uma ferramenta de simulação de eventos discretos que permite a criação, simulação e análise de modelos digitais de sistemas, visando possibilitar a tomada de decisões confiáveis nos diferentes estágios do planejamento da produção.

Além do modelamento e simulação dos sistemas de produção e respectivos processos, o software *Plant Simulation*[®] permite a análise do fluxo de materiais, obtenção de indicadores de utilização de recursos, dimensionamento de estoques e mão-de-obra, avaliação de *layouts* e sequenciamento de produção para todos os níveis de planejamento de fábrica, desde equipamentos isolados até instalações completas. Sua interface segue os padrões Microsoft Windows[®], conforme apresentado na Figura 15, possibilitando assim uma utilização fácil, rápida e intuitiva.

Figura 15 – Interface do software *Plant Simulation*[®]

Fonte: Autor

Entre os recursos disponíveis no software *Plant Simulation*[®], pode-se citar:

- simulação de sistemas de produção e estratégias de controle complexas;
- bibliotecas dedicadas para Mapeamento do Fluxo de Valor, *Warehouse*, Kanban, Análises Estatísticas, entre outras;
- gráficos dinâmicos para análises de rendimento e ocupação;
- ferramentas de análise abrangentes, incluindo analisador de gargalo e gráficos de Gantt;
- algoritmos genéticos, redes neurais e lógica Fuzzy para otimização de parâmetros do sistema;
- arquitetura de sistema aberta que oferece suporte a várias interfaces e recursos de integração, tais como ActiveX, CAD, Oracle, SQL, ODBC, XML entre outros.

A escolha da plataforma *Plant Simulation*[®] em detrimento às demais ferramentas de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado decai sobre a presença de uma biblioteca dedicada à análise de consumo de energia elétrica – *Energy Analyzer*. Este módulo, ao ser adicionado a um projeto de um sistema de produção, permite que parâmetros específicos de energia sejam atribuídos a cada um dos componentes que formam o projeto.

Neste aspecto, a simulação de energia elétrica trata o perfil de carga como uma propriedade específica do estado das máquinas, através de uma lista de valores de potência. Os seguintes estados de energia estão disponíveis para cada componente: *working*, *setting-up*, *operational*, *failed*, *standby* e *off*.

Adicionalmente, pode-se configurar tempos de transição entre os estados, conforme apresentado na janela de parametrização exibida na Figura 16:

Figura 16 – Janela de configuração dos parâmetros de energia

Fonte: Autor

Com o início da simulação, não apenas o fluxo de materiais, mas também o perfil de energia de todo o sistema é monitorado. Para cumprir este objetivo, o perfil de potência associado é utilizado para o cálculo do consumo de energia elétrica após cada mudança no estado de manufatura da máquina, registrando-se o período e o respectivo estado de energia em uma tabela. Desta forma, permite-se o cálculo de dados de energia sem alterar métodos já existentes e, portanto, sem influenciar o modelo de fluxo de material.

Ao manter a tabela de valores de energia continuamente atualizada de acordo com as mudanças dos estados e períodos de início e fim, ao final da simulação têm-se os valores de consumo de energia elétrica consolidados de cada máquina, bem como os seus tempos de ocorrência. Desta forma, o sistema permite o cálculo automático do consumo total de energia

elétrica através da soma de todas as cargas individuais presentes na mesma hierarquia, além de estratificá-las de acordo com o consumo atribuído a cada estado de operação. Adicionalmente, é também registrada a demanda de potência elétrica necessária durante toda a operação. Uma representação desta saída de dados disponibilizada pela ferramenta, em formato de tabelas e gráficos, é apresentada na Figura 17:

Figura 17 – Visualização dos dados de energia elétrica do software *Plant Simulation*[®]

Fonte: Autor

Considerando-se que este trabalho utiliza como referência de desempenho energético os indicadores propostos por May et al. (2015), a adequada utilização da ferramenta de simulação proposta requer o estabelecimento de relações entre os estados de energia indicados pelos autores do artigo e os estados existentes para configuração no software. Neste contexto, a relação de correspondência entre estas abordagens é verificada no Quadro 7:

Quadro 7 – Correspondência entre estados de energia

Estados de energia (May et al., 2015)	Estados de energia (<i>Plant Simulation</i> [®])
Desligado	<i>off</i>
Desenergização	-
<i>Standby</i>	<i>standby</i>
Manutenção	<i>failed</i>
Operacional	<i>operational</i>
<i>Setup</i>	<i>setting-up</i>
Energização	-
Processamento	<i>working</i>

Fonte: Autor

Os estados de energização e desenergização, referentes ao consumo de energia elétrica das etapas de inicialização e desligamento dos equipamentos, não estão presentes no software. Os consumos decorrentes destas etapas serão resultantes dos respectivos tempos de transição atribuídos entre estados, com os equipamentos em nível de energia operacional.

Neste aspecto, observa-se que a ferramenta de simulação empregada fornece os subsídios necessários para a adequada execução da análise proposta por este estudo, provendo dados de referência para o cálculo dos indicadores de eficiência energética propostos por May et al. (2015), assim como variáveis referentes à manufatura, tais como tempos de produção e número de peças produzidas para os cenários simulados.

3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO E PREMISSAS ADOTADAS

A implementação do modelo de simulação no software *Plant Simulation*[®] envolve tanto a abordagem dos parâmetros de produção quanto as variáveis energéticas – demanda e consumo. Neste contexto, os parâmetros de produção serão devidamente configurados considerando-se a relação existente entre o consumo de energia elétrica e a capacidade produtiva da linha em análise.

Foi adotada nesta simulação a produção de um único modelo de bloco de motor e respectivos tempos de ciclo dos equipamentos, além de parâmetros adicionais utilizados pela ferramenta de gerenciamento de energia elétrica, tais como tempos de transição entre os estados de operação. Os estados de energia dos equipamentos descritos anteriormente foram parametrizados através de configurações internas ao modelo, assim como suas respectivas potências nominais. Adicionalmente, as seguintes premissas foram adotadas para a elaboração do modelo:

- a) cada estação tem uma velocidade nominal constante, determinada pelo respectivo tempo de ciclo. Uma estação pode operar fora de seu ciclo nominal em caso de ausência de peças ou bloqueio do equipamento seguinte;
- b) há um mecanismo a montante da linha, o qual controla a liberação contínua de peças. Cada peça é enviada para processamento na primeira máquina apenas se a mesma estiver disponível para processá-la;
- c) após a conclusão de todo o processamento, a peça sai da linha e é encaminhada diretamente para outra seção da planta;
- d) não há retrabalho ou rejeito de peças. Todas as peças que concluem o processamento são consideradas boas;

- e) falhas e manutenções não programadas são passíveis de ocorrência. A ocorrência destes eventos para cada equipamento é determinada através dos valores de disponibilidade e dos tempos de MTTR considerados;
- f) cada equipamento pode assumir os seguintes estados de energia: desligado, *standby*, manutenção, operacional e processamento. A transição entre dois estados é disparada através da ocorrência de um evento de controle, como a chegada de uma peça ou a ausência de matéria-prima.

A operação fabril da planta foi fixada em 03 turnos de 08 horas, 07 dias por semana. Para efeitos de estudo, as análises e comparativos de energia elétrica serão realizados através de um período de 48 horas, o qual permite um diagnóstico abrangente do comportamento da linha e dos dispositivos que a constituem. Este período contempla 8,553 minutos correspondentes ao aquecimento da linha, definido pelo tempo necessário para o preenchimento total do sistema após a inicialização da linha em vazio.

A linha de base de produção para o período proposto é obtida a partir da seguinte expressão:

$$N^{\circ} \text{ peças} = \frac{\text{Tempo Total} - \text{Tempo Aquecimento}}{\text{Maior tempo de ciclo unitário}} \rightarrow \frac{2880 \text{ min} - 8,553 \text{ min}}{0,5135 \text{ min}} \rightarrow$$

$$N^{\circ} \text{ peças} = 5591 \text{ peças} \quad (2)$$

Desta forma, a linha de base de produção para o sistema em análise é de 5591 peças para um período de 48 horas, considerando-se um regime de operação ideal, ou seja, sem interferências externas que possam afetar o desempenho global da linha, tais como a ocorrência de falhas e manutenções não programadas.

Não são consideradas operações de *setup* neste estudo, assim como seu respectivo estado de energia associado. Paradas planejadas de manutenção também não estão previstas neste modelo.

A avaliação da utilização dos recursos humanos envolvidos – operadores e mantenedores – não é alvo deste estudo. Por tratar-se de consumo de natureza constante e avulso em relação ao processo, a análise do sistema de iluminação foi desconsiderada no modelo proposto.

O modelo de simulação formatado não leva em conta o perfil de enquadramento tarifário da instalação fabril, pois envolve a aplicação de indicadores que independem deste dado. Desta forma, há o mesmo tratamento para os dados de consumo e demanda de potência elétrica independentemente da hora do dia – ponta ou fora de ponta.

3.4 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo de simulação elaborado foi submetido à procedimento de verificação, visando certificar a adequada transcrição do mesmo ao software de simulação aplicado. Para isto, procedeu-se com a verificação individual de todas as configurações e rotinas computacionais do modelo, assim como foram analisados os valores gerados para as variáveis e parâmetros do sistema.

Adicionalmente foi executada também a validação do modelo de simulação criado, visando-se certificar que as respostas do sistema atribuídas ao modelo possuem precisão para representar o comportamento do sistema real. Neste caso, o modelo foi executado considerando-se as mesmas condições impostas ao sistema pelo estudo publicado por Chang et al. (2013), a partir do qual foram obtidos os dados básicos de configuração do sistema. Os dados resultantes obtidos por ambos os estudos para um mesmo padrão situacional foram submetidos à comparação, não apresentando diferenças entre si, caracterizando assim a validação do modelo.

3.5 CENÁRIOS PROPOSTOS

O presente estudo propõe a avaliação de diferentes cenários, através da técnica de simulação, visando a melhoria de indicadores de eficiência energética em uma linha de produção discreta. Adicionalmente, busca-se também testar o conceito de múltiplos estados de energia em linhas seriais de manufatura, assim como analisar os possíveis impactos da aplicação de ações de controle de energia na saída de produção destes sistemas, representada através da quantidade de unidades produzidas.

Diante deste contexto de análise comparativa entre diferentes estratégias, este estudo busca apresentar a avaliação dos indicadores de energia elétrica e produção para diversos cenários, os quais poderão permitir uma abordagem sistemática e prática para a implementação do método proposto em sistemas de fabricação reais. Desta forma, os seguintes cenários de análise são propostos:

- a) cenário 1 – linha de produção sem ocorrências de paradas não planejadas e equipamentos assumindo apenas os estados de energia “operacional” e “processamento”. Este cenário visa analisar os indicadores de energia elétrica em uma situação sem distúrbios aleatórios e operação sincronizada. O fato de se considerar apenas dois estados de energia deve-se à prática habitual da indústria, colocada por Chang et al. (2013), na qual inúmeros sistemas ainda operam com a ausência de múltiplos estados de operação;
- b) cenário 2 – adição do estado *standby* para o cenário 1. Este cenário busca avaliar o potencial de incremento de eficiência energética através da aplicação de múltiplos estados de operação com transição automática em uma situação sem distúrbios aleatórios e operação sincronizada. A transição automática entre os estados de energia será implementada através de estratégia de balanceamento de conteúdo dos *buffers* da linha;
- c) cenário 3 – inicialização dos equipamentos em modo *standby* para o cenário 2. Este cenário objetiva avaliar o impacto nos indicadores de eficiência energética da linha, considerando-se a partida de operação dos equipamentos em modo *standby* e mantendo-se as rotinas de gerenciamento de conteúdo dos *buffers* apresentadas no cenário 2;
- d) cenário 4 – linha de produção com ocorrência de paradas não planejadas aleatórias e equipamentos assumindo apenas os estados de energia “operacional” e “processamento”. Este cenário visa analisar os indicadores de energia elétrica em uma situação normal de produção, a qual possui o sincronismo afetado devido a ocorrência de eventos não previstos de paradas individuais das máquinas. O fato de se considerar apenas dois estados de energia deve-se à prática habitual da indústria, colocada por Chang et al. (2013), na qual inúmeros sistemas ainda operam com a ausência de múltiplos estados de operação;
- e) cenário 5 – adição do estado *standby* para o cenário 4. Este cenário busca avaliar o potencial de incremento de eficiência energética através da aplicação de múltiplos estados de operação com transição automática em uma situação com distúrbios aleatórios na operação. A transição automática entre os estados de energia será implementada através de estratégia de tomada de decisão de acordo com o estado da máquina anterior e a ocupação dos *buffers*. Ademais, busca-se também estabelecer um comparativo de saída de produção – *throughput* – entre as

alternativas, visando-se avaliar os possíveis impactos decorrentes da implementação do modelo proposto;

- f) cenário 6 – alteração de *layout* da linha, através da inclusão de *buffers* individuais com capacidade unitária para os equipamentos. Este cenário propõe a inserção de *buffers* em cada uma das máquinas, visando o controle de ativação dos estados de energia de acordo com o monitoramento da ocorrência de falhas nos equipamentos. A implementação desta estratégia busca maximizar o potencial de incremento de eficiência energética em relação às demais alternativas apresentadas, assim como avaliar os possíveis impactos decorrentes de sua implantação.

4 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

A avaliação dos cenários propostos e a análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo é efetuada considerando-se duas situações operacionais distintas da linha em referência:

- linha de produção sem a ocorrência de falhas: considera um regime de operação ideal da linha, ou seja, prevê a ausência de eventos externos que possam afetar o comportamento global do sistema. Engloba os cenários 1, 2 e 3;
- linha de produção com a ocorrência de falhas aleatórias: prevê um regime de operação real da linha, ou seja, considera a ocorrência de eventos aleatórios de falha nos equipamentos que compõem a linha, interferindo assim no comportamento global do sistema. Envolve os cenários 4, 5 e 6.

4.1 LINHA SEM OCORRÊNCIA DE FALHAS

Os cenários iniciais avaliados consideram a linha de produção sem ocorrências de paradas não planejadas, ou seja, o modelo elaborado conta com a configuração dos fluxos de produção associados a um sistema de produção sem distúrbios aleatórios e com operação sincronizada.

A Figura 18 apresenta o modelo de simulação criado para a avaliação deste panorama:

Figura 18 – Modelo de simulação de linha de produção

Fonte: Autor

Neste modelo, nenhuma alteração física foi realizada em relação à linha originalmente proposta por Chang et al. (2013). Desta forma, tanto o *layout* quanto o fluxo produtivo representam a concepção original do sistema.

4.1.1 Produção máxima sem ações de controle de energia

O primeiro cenário simulado refere-se à produção máxima da linha, a qual representa a quantidade total produzida no tempo atribuído – 48 horas –, assim como considera também os produtos em processo restantes ao final do período.

Adicionalmente, este considera, devido à prática habitual da indústria, equipamentos assumindo apenas dois estados de energia: operacional e processamento.

Os resultados obtidos através do estudo de 48 horas de operação englobam tanto parâmetros de manufatura quanto variáveis relacionadas ao consumo de energia elétrica. A Tabela 3 sintetiza os principais dados de manufatura obtidos para o cenário em análise:

Tabela 3 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 1

Estação	Quantidade Produzida (un.)	Tempo em processamento (%)	Tempo aguardando peças (%)	Tempo em bloqueio (%)
M1	5887	100,00	0,00	0,00
M2	5886	83,22	16,78	0,00
M3	5885	99,70	0,30	0,00
M4	5861	98,16	1,18	0,66
M5	5860	95,33	3,49	1,18
M6	5859	98,30	1,07	0,63
M7	5858	96,99	2,14	0,87
M8	5757	94,62	0,12	5,26
M9	5756	99,87	0,13	0,00
M10	5755	94,49	5,51	0,00
M11	5754	89,18	10,82	0,00
M12A	2849	95,31	0,20	4,49
M12B	2848	96,45	0,21	3,34
M13	5696	98,90	0,21	0,88
M14	5695	89,82	6,29	3,89
M15	5594	99,75	0,25	0,00
M16	5593	90,15	9,85	0,00
M17	5592	93,80	6,20	0,00
M18	5591	90,61	9,39	0,00

Fonte: Autor

Em um período de 48 horas de produção, obteve-se um resultado final de 5591 peças produzidas, com uma alocação média dos equipamentos em modo de processamento superior à 90% do tempo total.

Os tempos mais elevados de espera por peças são observados nos equipamentos que possuem os menores tempo de ciclo do sistema – M2, M11, M14, M16 e M18.

Os tempos de bloqueio são verificados em todas as máquinas que compõem os trechos antecedentes aos *buffers* 2 e 4, indicando que a ocupação total destes foi atingida em determinado momento. É observada também a presença de bloqueio na máquina M8, a qual deve-se à diferença dos tempos de ciclo entre a primeira máquina abastecida após um *buffer* – M8 – e uma máquina com tempo de ciclo maior em sua sequência posterior – M9.

Ademais, faz-se também necessária a análise das peças em processo resultantes no momento de finalização do período simulado, alocadas nos *buffers* e máquinas, conforme apresentado na Tabela 4:

Tabela 4 – Alocação final de *buffers* e máquinas no cenário 1

Estação	Peças em Processo (un.)
Buffer 1	23
Buffer 2	100
Buffer 3	55
Buffer 4	100
Máquinas (global)	19
TOTAL	297

Fonte: Autor

De acordo com os dados apresentados, os *buffers* 2 e 4 apresentam a alocação máxima determinada para os mesmos, indicando assim elevada ocupação em relação aos demais componentes integrantes da linha. O comportamento da ocupação destes *buffers* conforme a evolução do tempo de produção pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Alocação dos *buffers* de acordo com tempo de produção no cenário 1

Fonte: Autor

O primeiro local de armazenamento de peças a atingir ocupação máxima foi o *buffer* 4, após 1 dia, 07 horas e 30 minutos de produção. Considerando-se que este sistema de produção não sofrerá interferências externas que possam afetar o desempenho global, a tendência observada é que todos os *buffers* atinjam o limite de suas respectivas capacidades em períodos maiores de simulação, bloqueando os equipamentos produtivos e, consequentemente, desbalanceando o sistema.

Este comportamento é também claramente evidenciado através da retirada da restrição de capacidade dos *buffers*, conforme apresentado na Figura 20:

Figura 20 - Alocação dos *buffers* sem restrição de capacidade no cenário 1
Ocupação de Buffers

Fonte: Autor

A tendência verificada denota que os *buffers* 2 e 4 apresentam constante aumento de alocação ao longo do tempo produtivo, convergindo para um cenário de ocupação infinita caso suas capacidades não sejam limitadas.

Em uma segunda abordagem, a simulação disponibiliza também os dados referentes ao comportamento energético da linha no período analisado. Desta forma, o gráfico apresentado na Figura 21 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total gasto pelos mesmos.

Figura 21 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 1
Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

A Tabela 5 apresenta também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento, assim como o consumo global da linha:

Tabela 5 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 1

Estação	Consumo Total (kWh)	Consumo estado processamento (kWh)	Consumo estado operacional (kWh)
M1	672,00	672,00	0,00
M2	1074,70	958,74	115,96
M3	671,18	669,96	1,22
M4	714,71	706,78	7,93
M5	1177,59	1.143,98	33,61
M6	1191,84	1.179,59	12,25
M7	616,50	605,25	11,25
M8	704,51	681,28	23,23
M9	575,70	575,25	0,45
M10	657,19	634,97	22,22
M11	964,37	898,93	65,44
M12A	1130,39	1.097,97	32,42
M12B	1135,63	1.111,08	24,55
M13	669,05	664,62	4,43
M14	920,91	862,28	58,63
M15	575,43	574,58	0,85
M16	645,54	605,84	39,70
M17	655,33	630,32	25,01
M18	692,96	652,40	40,56
TOTAL	15445,53	14925,82	519,71
TOTAL (%)	100,0%	96,63%	3,37%

Fonte: Autor

Pode-se verificar através dos dados obtidos que o consumo de energia elétrica referente ao estado operacional equivale aos períodos nos quais as máquinas estiveram aguardando peças ou em bloqueio. Já o consumo do estado processamento refere-se ao período efetivo de processamento das peças, englobando tanto as 5591 peças acabadas quanto as 297 unidades ainda em processo.

A partir destas informações, é possível analisar a eficiência energética do cenário apresentado mediante diferentes indicadores, tais como a quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{15445,53 \text{ kWh}}{5591 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = 2,762 \text{ kWh/un.} \quad (3)$$

De maneira complementar, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), apresenta a razão entre a energia elétrica consumida para a produção de produtos vendáveis e o consumo geral de energia elétrica dos equipamentos, ou seja, apresenta o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado majoritariamente para as atividades que geram valor.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{14925,82 \text{ kWh}}{15445,53 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,9663 \quad (4)$$

O elevado índice alcançado para este cenário reflete a ausência de eventos externos, tais como falhas, operações de *setup*, entre outros, que afetam o desempenho geral da linha. Desta forma, o percentual não aplicado para as atividades que geram valor é baixo – apenas 3,37%. No entanto, é válido salientar que, diferentemente do indicador de consumo/peça produzida, o *Lean Energy Indicator* considera também as atividades de processamento relacionadas às peças que ainda estão em execução como geradoras de valor.

No que tange à demanda de energia, a análise realizada demonstra que a demanda máxima deste cenário representa o ponto no qual todas as máquinas estão em atividade de processamento, resultando na soma de todas as potências referentes a este estado. Neste

contexto, o sistema em referência apresenta uma demanda máxima de 329 kW. A Figura 22 apresenta o comportamento da demanda de potência elétrica durante o período em análise:

Figura 22 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 1
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Pode-se verificar que o início de produção apresenta uma demanda de potência elétrica pouco acima de 200 kW, devido à inicialização simultânea de todos os equipamentos da linha em modo operacional. Após este momento, a demanda aumenta constantemente conforme os equipamentos são acionados em modo de processamento, devido à execução da primeira peça, alcançando os 329 kW máximos e permanecendo durante todo o período com demanda acima de 250 kW.

Uma maior incidência de pontos próximos ao patamar mínimo de demanda de potência elétrica atingido – 250 kW – está concentrada nas últimas 10 horas de produção simuladas. Este efeito deve-se ao alcance de ocupação máxima dos *buffers* 2 e 4, impedindo as máquinas dos trechos imediatamente anteriores a estes *buffers* de processarem novas peças.

De maneira geral, os índices apresentados demonstram que o sistema está bem dimensionado para a condição presente, porém, estratégias e alterações são passíveis de adoção visando incrementar ainda mais os valores obtidos através dos indicadores utilizados como referência neste estudo.

4.1.2 Produção máxima com ações de controle dos *buffers*

O segundo cenário simulado refere-se à proposta de alterações no controle da linha, visando avaliar o potencial de incremento de eficiência energética através da aplicação de múltiplos estados de operação com transição automática em uma situação sem distúrbios aleatórios e operação sincronizada.

A alteração principal neste contexto refere-se à adição do estado de “*standby*”, em complemento aos estados de energia “operacional” e “processamento” já presentes nos equipamentos. Adicionalmente, para a correta implementação do estado de *standby* no modelo existente, uma estratégia de balanceamento de conteúdo dos *buffers* foi definida.

Considerando-se que o sistema de produção em referência não sofrerá interferências externas que possam afetar o seu desempenho global, o armazenamento de peças em processo em grande quantidade nos *buffers* não se faz necessário. Sendo assim, propõe-se que os trechos que possuem menor tempo de ciclo, que resultam atualmente no armazenamento de peças em demasia nestes *buffers*, tenham seus equipamentos alocados em modo *standby* caso o *buffer* posterior atinja um valor pré-definido de peças. Neste caso, a entrada de peças do trecho correspondente – um *buffer* ou a entrada de matéria-prima – é bloqueada e os equipamentos são acionados em modo *standby* a partir do processamento da última peça disponível até que o *buffer* posterior indique um número mínimo de peças. Ao atingir o nível mínimo, a entrada de peças do trecho correspondente é liberada e os equipamentos retornam progressivamente ao estado de processamento, de acordo com a chegada das novas peças a processar. A Figura 23 ilustra a estratégia de balanceamento de conteúdo dos *buffers* proposta para este cenário:

Figura 23 – Estratégia de balanceamento de conteúdo dos *buffers*

Fonte: Autor

A execução da simulação deste cenário repete o objetivo de produção máxima da linha em um período compreendido por 48 horas. A Tabela 6 apresenta os principais dados de manufatura obtidos para esta proposta, assim como um comparativo em relação aos resultados obtidos pelo cenário anteriormente descrito no item 4.1.1 – definido como “cenário 1” na tabela –, o qual não contemplava ações de controle de energia:

Tabela 6 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de *buffers*

Estação	Qtde. Produzida (un.)		Tempo em processamento (%)		Tempo aguardando peças (%)	
	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1
M1	5618	5887	95,42	100,00	4,52	0,00
M2	5617	5886	79,41	83,22	19,17	16,78
M3	5616	5885	95,13	99,70	4,81	0,30
M4	5614	5861	94,03	98,16	5,58	1,18
M5	5613	5860	91,32	95,33	5,77	3,49
M6	5612	5859	94,16	98,30	5,69	1,07
M7	5611	5858	92,91	96,99	6,98	2,14
M8	5605	5757	92,14	94,62	2,67	0,12
M9	5604	5756	97,24	99,87	2,70	0,13
M10	5603	5755	92,01	94,49	7,93	5,51
M11	5603	5754	86,83	89,18	13,11	10,82
M12A	2800	2849	93,69	95,31	2,71	0,20
M12B	2800	2848	94,81	96,45	2,33	0,21
M13	5599	5696	97,22	98,90	2,72	0,21
M14	5599	5695	88,29	89,82	11,65	6,29
M15	5594	5594	99,75	99,75	0,25	0,25
M16	5593	5593	90,15	90,15	9,85	9,85
M17	5592	5592	93,80	93,80	6,20	6,20
M18	5591	5591	90,61	90,61	9,39	9,39

Fonte: Autor

Em um período de 48 horas de produção, obteve-se o mesmo resultado final de produção em relação ao cenário anteriormente apresentado – 5591 peças produzidas. No entanto, observa-se uma queda considerável na produção individual das máquinas no trecho M1-M14, sendo esta resultante do gerenciamento de *buffers* implementado, o qual prevê períodos de parada programada para os equipamentos sempre que os *buffers* atingem determinada proporção de sua capacidade total. É válido salientar que a estratégia implementada não atinge o último trecho da linha, composto pelas máquinas M15-M18, o qual possui saída livre de peças.

Ademais, observa-se também resultante da estratégia implementada uma redução do tempo de processamento, assim como um incremento nos tempos de espera por peças no trecho M1-M14. Isto deve-se à redução do número individual de peças produzidas, planejado através do bloqueio da entrada de peças nos respectivos trechos e consequente alocação das

máquinas em *standby*. Desta forma, as parcelas de tempo anteriormente utilizadas para a produção de peças que seriam alocadas em *buffers*, além do necessário para sincronizar a linha – modo processamento –, foram realocadas como períodos de espera por peças, nos quais os equipamentos assumem o modo de economia de energia programado.

Os tempos de bloqueio não sofreram alterações expressivas em relação ao estudo de simulação anterior, não sendo, desta forma, apresentados neste cenário para comparação. Os tempos de energização e desenergização dos equipamentos alocados em modo de *standby* perfizeram entre 0,06% e 0,11% do total, não sendo expressivos para uma análise particular. A alocação dos equipamentos em modo *standby* variou de 24 a 47 ciclos, a depender do trecho analisado.

Em relação à quantidade de peças em processo resultantes no momento de finalização do período analisado, alocadas nos *buffers* e máquinas, observa-se uma redução significativa em comparação ao cenário 1, conforme apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 – Alocação de *buffers* e máquinas para cenário com gerenciamento de buffers

Estação	Peças em Processo (un.)	
	Cenário 2	Cenário 1
<i>Buffer</i> 1	1	23
<i>Buffer</i> 2	5	100
<i>Buffer</i> 3	1	55
<i>Buffer</i> 4	4	100
Máquinas (global)	17	19
TOTAL	28	297

Fonte: Autor

Pode-se observar que, mesmo após 48 horas de produção, todos os *buffers* apresentam alocação controlada em relação às suas respectivas capacidades máximas – 100 peças. Isto mostra que as rotinas implementadas foram eficazes no controle de ocupação dos buffers, corrigindo a situação de alocação com tendência crescente máxima verificada no cenário 1. A Figura 24 apresenta a atuação do controle de alocação dos *buffers* proposto, mantendo-os com conteúdo sempre abaixo de 10 peças.

Figura 24 – Alocação dos *buffers* de acordo com tempo de produção para o cenário 2
Ocupação de Buffers

Fonte: Autor

Os intervalos verificados entre os conteúdos máximo e mínimo de alocação dos *buffers* são justamente os períodos nos quais são executadas as ações de controle de energia dos equipamentos, colocando-os em modo de *standby* progressivamente e retornando-os à produção quando atingido o volume mínimo determinado.

Em relação ao comportamento energético da linha, os dados disponibilizados pela simulação executada passam a integrar também o consumo dos equipamentos em modo *standby*. O gráfico apresentado na Figura 25 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total consumido pelos mesmos neste novo cenário, considerando-se também o consumo do estado *standby* conforme proposto.

Figura 25 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 2
Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

A Tabela 8 apresenta também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento e o consumo global da linha, assim como um comparativo em relação aos resultados de comportamento energético obtidos pelo cenário anteriormente descrito no item 4.1.1 – definido como “cenário 1” na tabela –, o qual não contemplava ações de controle de energia:

Tabela 8 – Dados obtidos de energia para o cenário 2

Estação	Consumo Total (kWh)		Consumo proces. (kWh)		Consumo operacional (kWh)		Consumo <i>standby</i> (kWh)
	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	
M1	644,51	672,00	641,25	672,00	0,22	0,00	3,04
M2	1.030,54	1074,70	914,84	958,74	110,38	115,96	5,32
M3	643,53	671,18	639,29	669,96	1,17	1,22	3,07
M4	683,12	714,71	677,02	706,78	2,16	7,93	3,94
M5	1.125,19	1177,59	1.095,82	1.143,98	22,74	33,61	6,63
M6	1.138,65	1191,84	1.129,92	1.179,59	2,06	12,25	6,67
M7	588,77	616,50	579,75	605,25	5,51	11,25	3,51
M8	688,13	704,51	663,37	681,28	22,92	23,23	1,84
M9	562,26	575,70	560,12	575,25	0,66	0,45	1,48
M10	641,72	657,19	618,27	634,97	21,69	22,22	1,76
M11	941,48	964,37	875,28	898,93	63,51	65,44	2,69
M12A	1.108,46	1130,39	1.079,32	1.097,97	26,25	32,42	2,89
M12B	1.116,01	1135,63	1.092,19	1.111,08	21,41	24,55	2,41
M13	656,10	669,05	653,32	664,62	1,09	4,43	1,69
M14	902,69	920,91	847,63	862,28	52,59	58,63	2,47
M15	575,43	575,43	574,58	574,58	0,85	0,85	0,00
M16	645,54	645,54	605,84	605,84	39,70	39,70	0,00
M17	655,33	655,33	630,32	630,32	25,01	25,01	0,00
M18	692,96	692,96	652,40	652,40	40,56	40,56	0,00
TOTAL	15040,42	15445,53	14530,53	14925,82	460,48	519,71	49,41
TOTAL (%)	100,0%		96,61%	96,63%	3,06%	3,37%	0,33%

Fonte: Autor

Pode-se verificar através dos dados obtidos que a estratégia proposta foi capaz de reduzir o consumo energético global da linha, assim como os consumos individuais referentes aos estados operacional e processamento quando comparados ao cenário que não conta com ações de controle de energia. A redução destes índices está atrelada à diminuição das peças em processo ao término do período – processamento de um número menor de unidades pelos equipamentos –, assim como pela alocação das máquinas em modo de *standby* durante as ações de balanceamento de conteúdo dos *buffers*. Desta forma, o consumo atrelado aos períodos nos quais os equipamentos permaneceram em modo de *standby* passa também a ser apresentado, perfazendo um total de 0,33% do consumo global.

O pequeno incremento do consumo em modo operacional observado em algumas máquinas isoladamente refere-se aos períodos de ativação das ações de controle para alocação dos equipamentos em modo *standby*.

Desta forma, a partir dos dados apresentados é possível avaliar a eficiência energética do cenário proposto, estabelecendo-se como parâmetro de comparação os resultados alcançados pelo cenário anteriormente descrito no item 4.1.1 – definido como “cenário 1” –, o qual não contemplava ações de controle de energia. Primeiramente, faz-se necessária a avaliação da quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{15040,42 \text{ kWh}}{5591 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = 2,69 \text{ kWh/un.} \quad (5)$$

O consumo por peça produzida no cenário proposto foi 2,6% menor em comparação ao cenário 1, o qual apresentou um consumo de 2,762 kWh/unidade.

Visando uma análise mais abrangente, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), será também aplicado em comparação ao cenário 1, indicando o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado para as atividades que geram valor.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{14530,53 \text{ kWh}}{15040,42 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,9661 \quad (6)$$

O índice calculado para o *Lean Energy Indicator* é ligeiramente menor que o obtido no cenário 1 – 0,9663 –, sendo justificado pelo gerenciamento de *buffers* implementado, o qual provê períodos de parada programada para os equipamentos sempre que os *buffers* atingem determinada proporção de sua capacidade total. Isto faz com que o número de peças em execução seja reduzido e, conseqüentemente, diminua não só o consumo global do sistema, mas também o consumo em modo de processamento, que gera valor. De qualquer, forma, o percentual não aplicado para as atividades que geram valor permanece baixo – apenas 3,39% – devido à permanência da condição de ausência de eventos externos que afetem o desempenho geral da linha.

Referente à demanda de energia, a simulação efetuada demonstra que a demanda máxima permanece em 329 kW para o cenário proposto, momento no qual todas as máquinas estão em atividade de processamento. A Figura 26 apresenta o comportamento da demanda de potência elétrica durante todo o período em análise:

Figura 26 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 2
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Comparativamente em relação ao cenário 1, o qual não possuía ações para gerenciamento de energia, observa-se um cenário com maior variação de demanda, apresentando em diversos momentos valores próximos de 150 kW. Estes momentos de menor demanda resultam da atuação do controle de conteúdo dos *buffers*, o qual aloca equipamentos em modo de *standby* e, conseqüentemente, reduz momentaneamente a demanda necessária para operação do sistema.

De acordo com os resultados e indicadores obtidos através do cenário proposto, verifica-se que a aplicação de estratégias de controle voltadas ao incremento de eficiência energética é viável, inclusive em cenários nos quais perdas finais de produção não são admissíveis. Adicionalmente, observa-se também que a utilização de equipamentos com múltiplos estados de energia permite minimizar o consumo em períodos nos quais os equipamentos encontram-se fora de operação, potencializando assim os resultados obtidos através da implementação de ações de controle voltadas ao gerenciamento de energia elétrica.

4.1.3 Produção máxima com ações de controle dos *buffers* e inicialização em modo de *standby*

O terceiro cenário simulado mantém as alterações efetuadas no controle da linha apresentadas no item 4.1.2, implementadas através de rotinas de gerenciamento de conteúdo dos *buffers*, e adiciona uma estratégia adicional de inicialização dos equipamentos em modo *standby*, objetivando maximizar o potencial de incremento de eficiência energética do sistema em análise.

Sabendo-se que o sistema de produção é inicializado em vazio, há uma parcela de tempo de espera relacionada ao preenchimento total da linha – tempo de aquecimento –, no qual as máquinas permanecem em estado operacional até a chegada da primeira peça em execução. Desta forma, propõe-se a implementação de estratégia na qual os equipamentos são acionados em modo *standby*, com menor consumo de energia elétrica, assumindo o estado de processamento apenas no ato de chegada da primeira peça a executar. De maneira geral, esta estratégia não interfere no controle e sequência de execução de peças, tal como o gerenciamento de *buffers*, sendo ativada apenas no início dos períodos de produção, enquanto os equipamentos encontram-se em estado de espera.

Mantendo-se a execução da simulação com objetivo de produção máxima da linha em um período compreendido por 48 horas, os principais dados de manufatura obtidos para esta proposta são detalhados na Tabela 9, assim como um comparativo em relação aos resultados obtidos pelos demais cenários já apresentados. Para efeitos de análise, estes cenários serão assim representados nos comparativos apresentados posteriormente:

- a) cenário 1: sem implementação de ações para controle de energia;
- b) cenário 2: implementação de ações de controle de conteúdo dos *buffers*, visando o incremento dos indicadores de eficiência energética do sistema em análise.

Tabela 9 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de *buffers* e inicialização em *standby* (continua)

Estação	Qtde. Produzida (un.)			Tempo em processamento (%)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
M1	5617	5618	5887	95,41	95,42	100,00
M2	5616	5617	5886	79,40	79,41	83,22
M3	5615	5616	5885	95,12	95,13	99,70
M4	5613	5614	5861	94,02	94,03	98,16
M5	5612	5613	5860	91,31	91,32	95,33
M6	5611	5612	5859	94,15	94,16	98,30
M7	5610	5611	5858	92,90	92,91	96,99

(conclusão)

Estação	Qtde. Produzida (un.)			Tempo em processamento (%)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
M8	5605	5605	5757	92,12	92,14	94,62
M9	5604	5604	5756	97,23	97,24	99,87
M10	5603	5603	5755	91,99	92,01	94,49
M11	5602	5603	5754	86,82	86,83	89,18
M12A	2800	2800	2849	93,68	93,69	95,31
M12B	2800	2800	2848	94,79	94,81	96,45
M13	5599	5599	5696	97,21	97,22	98,90
M14	5598	5599	5695	88,28	88,29	89,82
M15	5593	5594	5594	99,74	99,75	99,75
M16	5592	5593	5593	90,14	90,15	90,15
M17	5591	5592	5592	93,78	93,80	93,80
M18	5591	5591	5591	90,59	90,61	90,61

Fonte: Autor

O dado mais relevante obtido nesta análise refere-se ao resultado final de produção. Considerando-se um período de 48 horas de produção, o cenário proposto produziu 5591 peças acabadas, ou seja, a estratégia implementada resultou na mesma produção final em relação aos cenários 1 e 2. Isto indica que a soma dos tempos de transição dos equipamentos do modo *standby* para operacional/processamento durante a chegada da primeira peça a processar não é considerável a ponto de afetar o número de peças produzidas em um período de 48 horas.

De maneira complementar, observa-se também resultante da estratégia implementada uma leve redução do tempo de processamento de todos os equipamentos, devida justamente ao período alocado em modo *standby* durante a inicialização da linha, o qual impacta também a quantidade produzida por equipamento, representada através da ligeira variação de produção individual observada em algumas máquinas quando em comparação aos cenários anteriores.

Os tempos de bloqueio e de espera por peças não sofreram alterações expressivas em relação aos estudos de simulação anteriores, não sendo, desta forma, apresentados neste cenário para comparação. Os tempos de energização e desenergização dos equipamentos alocados em modo de *standby* perfizeram entre 0,01% e 0,11% do total, não sendo expressivos para uma análise particular. No entanto, é válido salientar que este cenário proposto propiciou a alocação de todos os equipamentos da linha em modo *standby* durante ao menos um ciclo. A alocação dos equipamentos em modo *standby* variou de 1 a 48 ciclos, a depender do trecho analisado.

Referente à quantidade de peças em processo resultantes no momento de finalização do período analisado, alocadas nos *buffers* e máquinas, observa-se um comportamento similar ao cenário 2, devido à manutenção do controle de *buffers* já apresentado anteriormente. A

Tabela 10 apresenta a comparação da quantidade de peças em processo em relação aos cenários anteriormente apresentados:

Tabela 10 – Alocação final de *buffers* e máquinas para cenário 3

Estação	Peças em Processo (un.)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
Buffer 1	1	1	23
Buffer 2	4	5	100
Buffer 3	0	1	55
Buffer 4	4	4	100
Máquinas (global)	18	17	19
TOTAL	27	28	297

Fonte: Autor

Conforme já apresentado no cenário 2, as ações de controle de conteúdo dos *buffers* mantêm alocação controlada dos mesmos em relação à capacidade total projetada. A atuação destes controles segue inalterada em relação ao cenário 2, assim como seu comportamento resultante de ocupação. Desta forma, este item não será explorado na análise deste cenário.

No que tange ao comportamento energético da linha, os dados disponibilizados pela simulação executada passam a indicar a habilitação do modo *standby* em todos os equipamentos da linha, inclusive no trecho M15-M18, não ativo no cenário 2. O gráfico apresentado na Figura 27 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total consumido pelos mesmos neste novo cenário proposto.

Figura 27 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 3
Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

As tabelas 11 e 12 apresentam também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento e o consumo global da linha, assim como um comparativo em relação aos resultados de comportamento energético obtidos pelos cenários 1 e 2 anteriormente analisados:

Tabela 11 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 3 (1)

Estação	Consumo Total (kWh)			Consumo proces. (kWh)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
M1	644,44	644,51	672,00	641,16	641,25	672,00
M2	1030,34	1.030,54	1074,70	914,74	914,84	958,74
M3	643,36	643,53	671,18	639,21	639,29	669,96
M4	682,87	683,12	714,71	676,95	677,02	706,78
M5	1.124,66	1.125,19	1177,59	1095,69	1.095,82	1.143,98
M6	1.138,01	1.138,65	1191,84	1129,79	1.129,92	1.179,59
M7	588,39	588,77	616,50	579,69	579,75	605,25
M8	687,64	688,13	704,51	663,27	663,37	681,28
M9	561,81	562,26	575,70	560,03	560,12	575,25
M10	641,14	641,72	657,19	618,18	618,27	634,97
M11	940,52	941,48	964,37	875,15	875,28	898,93
M12A	1.107,29	1.108,46	1130,39	1079,15	1.079,32	1.097,97
M12B	1.114,75	1.116,01	1135,63	1092,02	1.092,19	1.111,08
M13	655,30	656,10	669,05	653,23	653,32	664,62
M14	901,46	902,69	920,91	847,49	847,63	862,28
M15	574,64	575,43	575,43	574,48	574,58	574,58
M16	644,55	645,54	645,54	605,73	605,84	605,84
M17	654,28	655,33	655,33	630,21	630,32	630,32
M18	691,78	692,96	692,96	652,28	652,40	652,40
TOTAL	15027,23	15040,42	15445,53	14528,45	14530,53	14925,82
TOTAL (%)		100,0%		96,68%	96,61%	96,63%

Fonte: Autor

Tabela 12 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 3 (2) (continua)

Estação	Consumo operacional (kWh)			Consumo standby (kWh)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
M1	0,23	0,22	0,00	3,05	3,04	0,00
M2	110,25	110,38	115,96	5,35	5,32	0,00
M3	1,04	1,17	1,22	3,11	3,07	0,00
M4	1,94	2,16	7,93	3,98	3,94	0,00
M5	22,25	22,74	33,61	6,72	6,63	0,00
M6	1,44	2,06	12,25	6,78	6,67	0,00
M7	5,12	5,51	11,25	3,58	3,51	0,00
M8	22,44	22,92	23,23	1,93	1,84	0,00
M9	0,22	0,66	0,45	1,56	1,48	0,00
M10	21,10	21,69	22,22	1,86	1,76	0,00
M11	62,50	63,51	65,44	2,87	2,69	0,00
M12A	25,02	26,25	32,42	3,12	2,89	0,00
M12B	20,08	21,41	24,55	2,65	2,41	0,00
M13	0,23	1,09	4,43	1,84	1,69	0,00
M14	51,26	52,59	58,63	2,71	2,47	0,00
M15	0,01	0,85	0,85	0,15	0,00	0,00
M16	38,63	39,70	39,70	0,19	0,00	0,00

(conclusão)

Estação	Consumo operacional (kWh)			Consumo <i>standby</i> (kWh)		
	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 2	Cenário 1
M17	23,87	25,01	25,01	0,20	0,00	0,00
M18	39,27	40,56	40,56	0,23	0,00	0,00
TOTAL	446,90	460,48	519,71	51,88	49,41	0,00
TOTAL (%)	2,97%	3,06%	3,37%	0,35%	0,33%	0,00%

Fonte: Autor

Através da análise dos dados obtidos, pode-se verificar que a estratégia proposta foi capaz de reduzir o consumo energético global da linha, assim como os consumos individuais referentes aos estados operacional e processamento quando comparados aos demais cenários analisados. A redução destes índices está atrelada à diminuição do número de peças processadas, resultante majoritariamente das ações de balanceamento de conteúdo dos *buffers* implementadas, assim como pela nova estratégia de alocação das máquinas em modo de *standby* durante a inicialização do período produtivo.

O pequeno incremento verificado no consumo em modo *standby* em comparação ao cenário 2 refere-se justamente à realocação do período relativo ao preenchimento da linha, o qual deixou de ser executado em modo operacional e passou a ter habilitado o modo *standby*. Uma comparação do consumo energético da linha nos três cenários simulados é apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Comparativo de consumo de energia elétrica entre cenários

Fonte: Autor

Neste contexto, a partir dos dados apresentados é possível avaliar a eficiência energética do cenário proposto, estabelecendo-se como parâmetro de comparação os resultados alcançados pelos cenários anteriormente analisados. Inicialmente, faz-se necessária a avaliação da quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]}/\text{unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{15027,23 \text{ kWh}}{5591 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]}/\text{unidade} = 2,687 \text{ kWh/un.} \quad (7)$$

O consumo por peça produzida no cenário proposto foi, respectivamente, 2,71% e 0,11% menor em relação aos cenários 1 e 2, conforme comparativo deste indicador apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Comparativo de consumo energético por unidade produzida

Fonte: Autor

Com o objetivo de prover uma análise mais abrangente, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), será também aplicado em comparação aos cenários anteriores, indicando o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado para as atividades que geram valor no cenário proposto.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{14528,45 \text{ kWh}}{15027,23 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,9668 \quad (8)$$

O índice calculado para o *Lean Energy Indicator* do cenário proposto é o melhor obtido dentre os três cenários avaliados. Isto é justificado pelas ações de controle de energia implementadas neste cenário durante a inicialização da linha, as quais diminuem o consumo em um momento no qual os equipamentos não executam atividades de processamento que

geram valor. A Figura 30 apresenta um comparativo deste indicador entre os três cenários propostos.

Figura 30 – Comparativo de índices do *Lean Energy Indicator* para os cenários propostos

Fonte: Autor

O percentual não aplicado para as atividades que geram valor é consideravelmente baixo – apenas 3,32% – devido majoritariamente, conforme explicitado anteriormente, à permanência da condição de ausência de eventos externos que afetem o desempenho geral da linha. No entanto, observa-se também que as ações implementadas de controle de energia permitem o incremento deste indicador, mesmo em condições já consideradas favoráveis.

Visando ainda prover uma análise comparativa completa entre os cenários apresentados, torna-se também fundamental a apresentação de indicadores financeiros. Neste aspecto, propõe-se o confronto do custo energético anual da linha em referência referente ao consumo de energia elétrica, considerando-se operação em 3 turnos de 08 horas, 365 dias por ano. As seguintes premissas foram adotadas para o cálculo deste custo anual:

- a) os dados utilizados para o cálculo do custo de energia elétrica referem-se às tarifas aplicadas pela distribuidora COPEL (COPEL, 2015) no estado do Paraná. Todos os impostos incidentes – ICMS, PIS e COFINS – já estão considerados na tarifa unitária apresentada, utilizando-se as alíquotas do estado correspondente;
- b) a bandeira tarifária aplicada refere-se à vigência do mês de novembro/2015, a qual estabelece a aplicação da bandeira tarifária vermelha, com custo adicional na tarifa de energia elétrica de R\$0,045/ kWh;
- c) considerado para este estudo consumidor do grupo A4 – setor industrial, com tensão de alimentação de 2,3 a 25 kV e demanda superior a 300kW – e tarifação

horosazonal azul, a qual define valores diferenciados para a demanda em horário de ponta e fora da ponta;

- d) aplicado o modelo de horário de ponta estabelecido pela distribuidora COPEL (COPEL, 2015), o qual é composto por três horas diárias consecutivas, de 2ª a 6ª feira das 18h às 21h ou das 19h às 22h no período de horário de verão. São considerados exceções para a aplicação do horário de ponta os sábados, domingos, terça-feira de Carnaval e os feriados definidos por lei federal;
- e) utilizado o ano de 2015 como referência para o estabelecimento do número de dias úteis nos quais são aplicadas as tarifas diferenciadas do horário de ponta.

O cálculo do custo energético anual para o consumo de energia elétrica é obtido a partir das seguintes expressões:

$$\text{Custo Anual} = \text{Consumo diário} * (\text{Custo kWh dia útil} * 251 + \text{Custo kWh dia não útil} * 114) \quad (9)$$

$$\text{Custo kWh dia útil} = \frac{\text{R\$}}{\text{KWh}} \text{Fora da Ponta} * 0,875 + \frac{\text{R\$}}{\text{KWh}} \text{Ponta} * 0,125 + \text{Bandeira} \quad (10)$$

$$\text{Custo kWh dia não útil} = \frac{\text{R\$}}{\text{KWh}} \text{Fora da Ponta} + \text{Bandeira} \quad (11)$$

A Tabela 13 demonstra os dados considerados, assim como o custo anual de consumo calculado para cada cenário analisado:

Tabela 13 – Comparativo do custo energético anual para consumo de energia elétrica

Cenário	Consumo diário (kWh)	R\$/ kWh Horário de Ponta	R\$/ kWh Fora da Ponta	Bandeira Tarifária (R\$/kWh)	Custo energético anual (R\$)
Cenário 1	7722,765	0,77915	0,52202	0,045	1.660.624,26
Cenário 2	7520,21				1.617.068,90
Cenário 3	7513,615				1.615.650,78

Fonte: Autor

Conforme apurado, o cenário 3 apresenta o menor custo energético anual absoluto de consumo dentre os cenários propostos. Em relação aos cenários 1 e 2, a redução no consumo observada representa uma economia anual de R\$ 44.973,48 e R\$ 1.418,12, respectivamente.

Em relação à demanda de energia, assim como nos demais cenários avaliados, a demanda máxima persiste em 329 kW, sendo alcançada nos períodos nos quais todas as

máquinas estão em atividade de processamento. O comportamento da demanda de potência elétrica durante todo o período em análise para o cenário proposto é apresentado na Figura 31:

Figura 31 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 3
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Confrontando-se o comportamento da demanda de potência elétrica em relação aos demais cenários, pode-se verificar a atuação do controle de inicialização da linha nos minutos iniciais de produção, o qual aloca os equipamentos em modo de *standby* até a chegada da primeira peça para processamento. Enquanto as demais simulações realizadas demonstram uma demanda inicial acima de 200 kW, a situação proposta inicializa a produção com uma demanda abaixo de 50 kW, sendo esta incrementada progressivamente até o acionamento em modo processamento de todas as máquinas, momento no qual o sistema tem seu comportamento de demanda equiparado ao observado no cenário 2.

Desta forma, através dos resultados obtidos observa-se que a aplicação de estratégias de controle de energia na inicialização do sistema, em conjunto com o gerenciamento de conteúdo dos *buffers* já implementado no cenário 2, proporciona o alcance dos melhores índices para os indicadores analisados dentre as situações simuladas.

Neste contexto, visualiza-se que as estratégias propostas são plenamente aplicáveis para os casos nos quais os sistemas produtivos possuem operação sincronizada, sem distúrbios aleatórios. Adicionalmente, as ações de controle propostas, voltadas ao gerenciamento de energia elétrica, não afetaram a quantidade final de peças produzidas nos cenários simulados, corroborando assim a aplicação das mesmas inclusive em cenários nos quais perdas finais de produção não são admissíveis.

4.2 LINHA COM OCORRÊNCIA DE FALHAS ALEATÓRIAS

Os cenários complementares avaliados neste estudo consideram a linha de produção em regime de operação real, ou seja, preveem também a ocorrência de paradas não planejadas que afetam o sincronismo do sistema durante o período produtivo.

Para esta situação, o modelo de simulação elaborado conta com a configuração dos parâmetros de disponibilidade e MTTR definidos para a linha. Foi aplicada a distribuição de probabilidade exponencial para estas variáveis, provendo assim a aleatoriedade proposta para a ocorrência de eventos não previstos de paradas individuais das máquinas.

4.2.1 Produção máxima sem ações de controle de energia

O primeiro cenário simulado que prevê a presença de distúrbios aleatórios na operação refere-se à produção máxima da linha, a qual representa a quantidade total produzida no tempo atribuído – 48 horas –, assim como considera também os produtos em processo restantes ao final do período. Devido à prática habitual da indústria, os equipamentos assumem nesta condição apenas os estados de energia operacional e processamento. A Tabela 14 sintetiza os principais dados de manufatura obtidos neste cenário:

Tabela 14 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 4

Estação	Quantidade Produzida (un.)	Tempo em processamento (%)	Tempo aguardando peças (%)	Tempo em bloqueio (%)	Tempo em manutenção (%)
M1	4336	73,65	0,00	19,45	6,90
M2	4335	61,29	16,30	20,97	1,44
M3	4334	73,42	5,55	7,46	13,58
M4	4310	72,19	9,75	14,42	3,64
M5	4309	70,10	13,70	12,08	4,12
M6	4308	72,28	16,76	10,59	0,37
M7	4307	71,32	17,93	9,15	1,61
M8	4206	69,13	9,82	17,43	3,61
M9	4205	72,96	13,38	9,34	4,32
M10	4204	69,03	21,22	9,75	0,00
M11	4203	65,15	24,68	6,79	3,39
M12A	2117	70,83	6,49	16,37	6,31
M12B	2057	69,64	8,01	15,26	7,08
M13	4173	72,45	13,42	7,08	7,05
M14	4172	65,79	25,46	3,71	5,04
M15	4155	74,10	13,41	7,37	5,13
M16	4154	66,97	23,63	1,97	7,44
M17	4154	69,67	28,37	1,97	0,00
M18	4153	67,29	30,66	0,00	2,05

Fonte: Autor

Em um período de 48 horas de produção, obteve-se um resultado final de 4153 peças produzidas, com uma alocação média dos equipamentos em modo de processamento em torno de 70% do tempo total. Desta forma, em comparação aos cenários anteriores que não preveem distúrbios aleatórios durante o período produtivo, observa-se uma redução na produção final de 1438 peças – -25,72% –, assim como um decréscimo de 20% na alocação dos equipamentos em modo de processamento.

Em contrapartida, verifica-se uma alocação considerável das máquinas em períodos de espera por peças e bloqueio em relação aos cenários anteriores. Isto decorre das paradas por manutenção não programadas, as quais bloqueiam os equipamentos produtivos anteriores ao ponto da falha, bem como deixam de abastecer as máquinas posteriores com novas peças, mesmo esta situação sendo atenuada pela presença de *buffers* na linha. Pode-se observar que os maiores tempos de bloqueio e de espera por peças estão justamente nos trechos adjacentes aos equipamentos com menor disponibilidade.

Adicionalmente, as parcelas mais elevadas de manutenção são observadas nos equipamentos que possuem as menores disponibilidades ou os maiores tempos de reparo configurados – M1, M3, M12A, M12B, M13 e M16. Apenas dois equipamentos que compõem a linha não apresentaram momentos de indisponibilidade por paradas não planejadas dentro do período simulado – M10 e M17.

Ademais, faz-se também importante a análise do comportamento dos *buffers* ao longo do período simulado, conforme apresentado nas Figuras 32 a 35:

Figura 32 – Ocupação do *buffer* 1 em cenário com paradas não planejadas
Ocupação - Buffer 1

Fonte: Autor

Figura 33 – Ocupação do *buffer* 2 em cenário com paradas não planejadas
Ocupação - Buffer 2

Fonte: Autor

Figura 34 – Ocupação do *buffer* 3 em cenário com paradas não planejadas
Ocupação - Buffer 3

Fonte: Autor

Figura 35 – Ocupação do *buffer* 4 em cenário com paradas não planejadas
Ocupação - Buffer 4

Fonte: Autor

Pode-se observar que os *buffers* existentes possuem grande variação de alocação durante todo o período analisado. Este comportamento decorre do armazenamento temporário de peças excedentes e do abastecimento destas peças aos trechos posteriores aos *buffers* em caso de paradas não planejadas, impedindo assim a paralisação total da linha e justificando a presença destes elementos no sistema em referência.

Em uma segunda abordagem, a simulação disponibiliza também os dados referentes ao comportamento energético da linha no período analisado. Desta forma, o gráfico apresentado na Figura 36 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total gasto pelos mesmos.

Figura 36 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 4
Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

A Tabela 15 apresenta também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento, assim como o consumo global da linha:

Tabela 15 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 4 (continua)

Estação	Consumo Total (kWh)	Consumo estado processamento (kWh)	Consumo estado operacional (kWh)	Consumo estado manutenção (kWh)
M1	584,93	494,91	78,42	11,60
M2	967,79	706,03	257,61	4,15
M3	568,60	493,35	52,44	22,81
M4	630,74	519,77	104,42	6,55
M5	1039,20	841,24	185,60	12,36
M6	1065,41	867,38	196,93	1,10
M7	548,90	445,02	101,37	2,51
M8	622,01	497,76	117,75	6,50
M9	505,00	420,26	78,53	6,21

(conclusão)

Estação	Consumo Total (kWh)	Consumo estado processamento (kWh)	Consumo estado operacional (kWh)	Consumo estado manutenção (kWh)
M10	588,75	463,87	124,88	0,00
M11	855,51	656,67	190,30	8,54
M12A	992,15	815,98	158,01	18,16
M12B	983,54	802,26	160,87	20,41
M13	581,36	486,87	82,65	11,84
M14	811,71	631,62	167,99	12,10
M15	505,99	426,81	71,80	7,38
M16	565,70	450,01	103,19	12,50
M17	590,46	468,15	122,31	0,00
M18	620,40	484,52	132,44	3,44
TOTAL	13628,15	10972,48	2487,51	168,16
TOTAL (%)	100%	80,51%	18,25%	1,24%

Fonte: Autor

Pode-se verificar através dos dados obtidos que o consumo de energia elétrica referente ao estado operacional equivale aos períodos nos quais as máquinas estiveram aguardando peças ou em bloqueio. Já o consumo do estado processamento refere-se ao período efetivo de processamento das peças, englobando tanto as 4153 peças acabadas quanto as unidades ainda em processo ao final do período analisado.

O consumo atrelado ao estado manutenção refere-se aos períodos nos quais os equipamentos estiveram em falha devido às paradas não planejadas de manutenção.

A partir destas informações, é possível analisar a eficiência energética do cenário apresentado mediante diferentes indicadores, tais como a quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{13628,15 \text{ kWh}}{4153 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = 3,281 \text{ kWh/un.} \quad (12)$$

De maneira complementar, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), apresenta o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado majoritariamente para as atividades que geram valor.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{10972,48 \text{ kWh}}{13628,15 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,8051 \quad (13)$$

O índice alcançado para este cenário comprova a influência das paradas não programadas no desempenho geral da linha. Desta forma, observa-se que o percentual não aplicado para as atividades que geram valor é alto em relação aos cenários que não previam distúrbios aleatórios – 19,49%.

No que tange à demanda de energia, a análise realizada demonstra que a demanda máxima deste cenário representa o ponto no qual todas as máquinas estão em atividade de processamento, resultando na soma de todas as potências referentes a este estado. Neste contexto, o sistema em referência apresenta uma demanda máxima de 329 kW. A Figura 37 apresenta o comportamento da demanda de potência elétrica durante o período em análise:

Figura 37 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 4
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Pode-se verificar que o início de produção apresenta uma demanda de potência elétrica pouco acima de 200 kW, devido à inicialização simultânea de todos os equipamentos da linha em modo operacional. Após este momento, a demanda aumenta constantemente conforme os equipamentos são acionados em modo de processamento, devido à execução da primeira peça, alcançando os 329 kW máximos apurados.

Uma grande variação de demanda é verificada durante todo o período analisado, alcançando por diversas vezes pontos abaixo de 200 kW. Isto ocorre devido às paradas não planejadas de determinados equipamentos, os quais impedem as demais máquinas de seu trecho de processarem novas peças. Este efeito é ainda amplificado quando os *buffers* atingem seus respectivos limites máximo ou mínimo de capacidade, fazendo com que parte da linha que se encontra operacional não possa processar novas peças, a depender de seu posicionamento físico no sistema.

De maneira geral, os índices apresentados demonstram que o sistema possui oportunidades para adoção de estratégias de gerenciamento de energia, visando incrementar os valores de eficiência energética obtidos através dos indicadores utilizados como referência neste estudo. A elevada parcela observada de consumo de energia elétrica em modo operacional, no qual as máquinas não estão efetivamente processando peças, denota que alterações são passíveis de implementação visando o melhor aproveitamento dos recursos de energia disponíveis.

4.2.2 Produção máxima com ações de controle de energia

O segundo cenário simulado que prevê a presença de distúrbios aleatórios na operação refere-se à proposta de alterações no controle da linha, visando avaliar o potencial de incremento de eficiência energética através da aplicação de múltiplos estados de operação com transição automática.

A alteração principal neste contexto refere-se à adição do estado de “*standby*”, em complemento aos estados de energia “operacional” e “processamento” já presentes nos equipamentos. Adicionalmente, para a correta implementação do estado de *standby* no modelo existente, uma estratégia de controle de energia foi inserida nos equipamentos, a qual toma decisões de acordo com o estado da máquina anterior e o conteúdo dos *buffers*.

Considerando-se que o sistema de produção em referência sofre interferências não programadas que afetam o seu desempenho global, a verificação prévia dos estados dos componentes da linha se faz necessária. Sendo assim, propõe-se que um equipamento seja alocado em modo *standby* caso a máquina imediatamente anterior a este esteja operando em vazio ou em estado de falha. Neste caso, a máquina a qual executa a rotina de controle proposta processa a peça atual e é acionada posteriormente em modo *standby* até que o equipamento imediatamente anterior disponibilize uma nova peça a processar. A Figura 38 ilustra esta estratégia de controle:

Figura 38 – Estratégia de controle de energia elétrica

Fonte: Autor

Adicionalmente, caso um *buffer* esteja próximo de sua ocupação máxima, a entrada de peças do trecho correspondente anterior – um *buffer* ou a entrada de matéria-prima – é bloqueada e os equipamentos são acionados em modo *standby* a partir do processamento da última peça disponível, até que o *buffer* posterior volte a indicar um número mínimo de peças. Ao atingir o nível mínimo definido, a entrada de peças do trecho correspondente é liberada e os equipamentos retornam progressivamente ao estado de processamento, de acordo com a chegada das novas peças a processar. Isto faz com que, caso atinja a capacidade máxima de um *buffer*, as máquinas do trecho imediatamente anterior não permaneçam bloqueadas com peças em seu interior, em modo operacional. Esta estratégia de controle de energia a partir do conteúdo dos *buffers* é apresentada na Figura 39:

Figura 39 – Estratégia de controle de energia a partir do conteúdo dos *buffers*

Fonte: Autor

A execução da simulação deste cenário repete o objetivo de produção máxima da linha em um período compreendido por 48 horas. A Tabela 16 apresenta os principais dados de manufatura obtidos para esta proposta, assim como um comparativo em relação aos resultados obtidos pelo cenário anteriormente descrito no item 4.2.1 – definido como “cenário 4” na tabela –, o qual não contemplava ações de controle de energia:

Tabela 16 – Dados obtidos de manufatura para cenário com gerenciamento de energia (continua)

Estação	Qtde. Produzida (un.)		Tempo em processamento (%)		Tempo aguardando peças (%)	
	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4
M1	4316	4336	73,32	73,65	9,05	0,00
M2	4315	4335	61,01	61,29	26,50	16,30
M3	4314	4334	73,08	73,42	13,30	5,55
M4	4290	4310	71,85	72,19	19,56	9,75
M5	4289	4309	69,78	70,10	24,31	13,70
M6	4288	4308	71,95	72,28	25,50	16,76
M7	4287	4307	70,99	71,32	26,26	17,93
M8	4191	4206	68,89	69,13	17,16	9,82
M9	4190	4205	72,70	72,96	20,81	13,38

(conclusão)

Estação	Qtde. Produzida (un.)		Tempo em processamento (%)		Tempo aguardando peças (%)	
	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4
M10	4189	4204	68,78	69,03	27,61	21,22
M11	4188	4203	64,91	65,15	30,11	24,68
M12A	2116	2117	70,80	70,83	9,62	6,49
M12B	2053	2057	69,50	69,64	11,20	8,01
M13	4168	4173	72,36	72,45	16,06	13,42
M14	4167	4172	65,71	65,79	28,39	25,46
M15	4150	4155	74,01	74,10	13,48	13,41
M16	4149	4154	66,88	66,97	23,64	23,63
M17	4148	4154	69,58	69,67	28,28	28,37
M18	4147	4153	67,21	67,29	30,56	30,66

Fonte: Autor

O dado mais relevante obtido nesta análise refere-se ao resultado final de produção. Considerando-se um período de 48 horas de produção, o cenário proposto produziu 4147 peças acabadas, ou seja, a estratégia implementada resultou na perda de seis unidades em relação ao cenário 4, o que representa uma queda de 0,144% na produção total. Esta perda é devida, basicamente, às estratégias de gerenciamento de energia implementadas, que alocam os equipamentos em modo *standby* durante determinadas situações. Isto impacta também a quantidade produzida por equipamento, representada através da ligeira redução de produção individual observada quando em comparação ao cenário anterior.

De maneira complementar, observa-se também resultante da estratégia implementada uma ligeira redução do tempo de processamento de todos os equipamentos, devida justamente à menor quantidade de peças processadas por máquina.

Ademais, observa-se também resultante da estratégia implementada um incremento considerável nos tempos de espera por peças, majoritariamente no trecho M1-M14. Isto deve-se à redução do número individual de peças produzidas, e, principalmente, à realocação dos tempos de bloqueio observados no cenário 4. Após a implementação de rotinas de controle de energia a partir do conteúdo dos *buffers*, as parcelas de tempo de bloqueio previamente verificadas nas máquinas anteriores à um *buffer* com ocupação máxima foram realocadas como períodos de espera por peças, nos quais os equipamentos assumem o modo de economia de energia *standby* programado.

Os tempos de energização e desenergização dos equipamentos alocados em modo de *standby* perfizeram entre 0,02% e 0,86% do total, não sendo expressivos para uma análise particular. A alocação dos equipamentos em modo *standby* variou de 9 a 427 ciclos, a depender do trecho analisado.

Os tempos de manutenção não sofreram alterações em relação ao estudo de simulação anterior, não sendo, desta forma, apresentados neste cenário para comparação.

Conforme já apresentado no cenário 4, há grande variação de alocação nos *buffers* durante todo o período analisado. Esta situação segue inalterada, portanto este item não será explorado na análise deste cenário.

Em relação ao comportamento energético da linha, os dados disponibilizados pela simulação executada passam a integrar também o consumo dos equipamentos em modo *standby*. O gráfico apresentado na Figura 40 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total consumido pelos mesmos neste novo cenário, considerando-se também o consumo do estado *standby* conforme proposto.

Figura 40 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 5
Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

A Tabela 17 apresenta também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento e o consumo global da linha, assim como um comparativo em relação aos resultados de comportamento energético obtidos pelo cenário anteriormente descrito no item 4.2.1 – definido como “cenário 4” na tabela –, o qual não contemplava ações de controle de energia:

Tabela 17 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 5

Estação	Consumo Total (kWh)		Consumo proces. (kWh)		Consumo operacional (kWh)		Consumo <i>standby</i> (kWh)
	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 4	
M1	553,62	584,93	492,68	494,91	43,26	78,42	6,08
M2	878,33	967,79	702,87	706,03	153,67	257,61	17,64
M3	523,56	568,60	491,13	493,35	0,79	52,44	8,83
M4	560,32	630,74	517,35	519,77	22,53	104,42	13,89
M5	903,91	1039,20	837,31	841,24	27,49	185,60	26,75
M6	915,86	1065,41	863,34	867,38	21,83	196,93	29,59
M7	471,73	548,90	442,95	445,02	11,00	101,37	15,27
M8	559,53	622,01	495,98	497,76	44,70	117,75	12,35
M9	448,48	505,00	418,76	420,26	12,33	78,53	11,18
M10	510,07	588,75	462,20	463,87	32,27	124,88	15,60
M11	741,87	855,51	654,31	656,67	56,48	190,30	22,54
M12A	936,56	992,15	815,57	815,98	91,74	158,01	11,09
M12B	918,39	983,54	800,67	802,26	84,41	160,87	12,90
M13	527,62	581,36	486,27	486,87	18,81	82,65	10,70
M14	705,17	811,71	630,84	631,62	40,99	167,99	21,24
M15	472,26	505,99	426,28	426,81	31,90	71,80	6,70
M16	519,72	565,70	449,44	450,01	48,63	103,19	9,15
M17	512,44	590,46	467,57	468,15	29,31	122,31	15,56
M18	536,63	620,40	483,92	484,52	32,56	132,44	16,71
TOTAL	12196,07	13628,15	10939,44	10972,48	804,70	2487,51	283,77
TOTAL (%)	100%		89,69%	80,51%	6,60%	18,25%	2,33%

Fonte: Autor

Pode-se verificar através dos dados obtidos que a estratégia proposta foi capaz de reduzir o consumo energético global da linha em 10,51%, assim como também diminuiu os consumos individuais referentes aos estados operacional e processamento quando comparados ao cenário que não conta com ações de controle de energia. A redução destes índices está atrelada à diminuição do número de peças processadas e, sobretudo, à aplicação de estratégias de controle de energia nos equipamentos, possibilitando assim a habilitação do estado *standby* em situações nas quais as máquinas permaneceriam em modo operacional, com maior consumo de energia elétrica. Desta forma, o consumo atrelado aos períodos nos quais os equipamentos permaneceram em modo de *standby* passa também a ser apresentado, perfazendo um total de 2,33% do consumo global.

Os valores de consumo referentes ao estado manutenção não sofreram alterações em relação ao estudo de simulação anterior, não sendo, desta forma, apresentados neste cenário para comparação.

Sendo assim, a partir dos dados apresentados é possível avaliar a eficiência energética do cenário proposto, estabelecendo-se como parâmetro de comparação os resultados alcançados pelo cenário anteriormente descrito no item 4.2.1 – definido como “cenário 4” –, o

qual não contemplava ações de controle de energia. Primeiramente, faz-se necessária a avaliação da quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{12196,07 \text{ kWh}}{4147 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]/unidade} = 2,941 \text{ kWh/un.} \quad (14)$$

O consumo por peça produzida no cenário proposto foi 10,36% menor em comparação ao cenário 4, o qual apresentou um consumo de 3,281 kWh/unidade.

Visando uma análise mais abrangente, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), será também aplicado em comparação ao cenário 4, indicando o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado para as atividades que geram valor.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{10939,44 \text{ kWh}}{12196,07 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,8969 \quad (15)$$

O índice calculado para o *Lean Energy Indicator* é consideravelmente maior que o obtido no cenário 4 – 0,8051 –, sendo justificado pelas ações de controle de energia implementadas neste cenário, as quais diminuem consideravelmente o consumo nos momentos nos quais os equipamentos não executam atividades de processamento que geram valor, alocando-os assim em modo *standby*. Desta forma, o percentual não aplicado para as atividades que geram valor é de 10,31%, o que representa uma melhoria de 47,1% em relação ao cenário anterior.

Seguindo-se as premissas estabelecidas no item 4.1.3 para o cálculo de indicadores financeiros, propõe-se também o confronto do custo energético anual relativo ao consumo de energia elétrica da linha em referência, comparativamente ao cenário anterior e considerando-se operação em 3 turnos de 08 horas, 365 dias por ano. A Tabela 18 sintetiza o custo anual calculado referente ao consumo de energia elétrica para os cenários analisados:

Tabela 18 – Comparativo do custo energético anual entre cenários 4 e 5

Cenário	Consumo diário (kWh)	R\$/ kWh Horário de Ponta	R\$/ kWh Fora da Ponta	Bandeira Tarifária (R\$/kWh)	Custo energético anual (R\$)
Cenário 4	6814,075	0,77915	0,52202	0,045	1.465.228,87
Cenário 5	6098,035				1.311.258,96

Fonte: Autor

Conforme verificado, o cenário simulado com ações de controle de energia apresenta menor custo energético absoluto de consumo em relação ao cenário 4, que não prevê a aplicação de estratégias para gerenciamento de energia elétrica. No entanto, faz-se também necessário traçar um paralelo entre o ganho financeiro obtido pela redução de consumo através das estratégias de controle de energia propostas e as perdas de produção verificadas em cada cenário. Embora proporcione uma redução no custo energético anual de R\$ 153.969,91, o cenário 5 deixa também de produzir 1095 unidades anuais em relação ao cenário anterior analisado.

Referente à demanda de energia, a simulação efetuada demonstra que a demanda máxima permanece em 329 kW para o cenário proposto, momento no qual todas as máquinas estão em atividade de processamento. A Figura 41 apresenta o comportamento da demanda de potência elétrica durante todo o período em análise:

Figura 41 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 5
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Comparativamente em relação ao cenário 4, o qual não possuía ações para gerenciamento de energia elétrica, observa-se um cenário com maior variação de demanda,

apresentando em diversos momentos valores abaixo de 100 kW. Esta maior variação e a presença de momentos de menor demanda resultam da atuação das ações de controle de energia implementadas, as quais alocam os equipamentos em modo de *standby* sempre que aplicável e, conseqüentemente, reduzem momentaneamente a demanda necessária para operação do sistema.

De acordo com os resultados e indicadores obtidos através do cenário proposto, verifica-se que a aplicação de estratégias de controle voltadas ao incremento de eficiência energética é viável, inclusive em cenários com ocorrência de paradas não planejadas aleatórias. Comparativamente ao cenário 4, a redução no consumo observada representa uma economia anual de R\$ 153.969,91. No entanto, uma redução de produção de 0,144% do total produzido é também apurada em relação ao cenário comparado. Logo, a análise da viabilidade de aplicação destas ações conjuntas de controle de energia passa também necessariamente pela análise da rentabilidade obtida por peça produzida, a qual varia de acordo com a indústria avaliada, não sendo alvo deste estudo.

De maneira complementar, observa-se também que a utilização de equipamentos com múltiplos estados de energia permite atenuar o consumo em períodos nos quais os equipamentos encontram-se fora de operação, potencializando assim os resultados obtidos através da implementação de ações de controle voltadas ao gerenciamento de energia elétrica.

4.2.3 Produção máxima com ações de controle de energia e alterações no *layout* da linha por meio da inclusão de *buffers* unitários

O terceiro cenário simulado com paradas não programadas mantém as alterações efetuadas no controle da linha apresentadas no item 4.2.2 e modifica o *layout* do sistema, através da inclusão de *buffers* unitários em determinadas posições, objetivando maximizar o potencial de incremento de eficiência energética do sistema em análise.

Considerando-se a ocorrência de falha aleatória em um equipamento da linha, todas as máquinas anteriores do mesmo trecho permanecerão bloqueadas, com uma peça já processada em seu interior, até que o equipamento em falha retorne sua operação normal. Sabendo-se que nesta situação os equipamentos bloqueados permanecem em estado operacional, com maior consumo de energia elétrica, propõe-se a implementação de *buffers* com capacidade unitária na saída das máquinas, sendo estes ocupados apenas na ocorrência de uma falha em um equipamento à jusante do mesmo trecho. Desta forma, as peças são alocadas nestes novos *buffers*, desbloqueando os equipamentos anteriores ao ponto de falha e possibilitando o

acionamento dos mesmos em modo *standby*, com menor consumo de energia elétrica. As máquinas voltam a assumir o estado de processamento apenas quando o equipamento em falha retorna ao estado operacional. A Figura 42 ilustra esta alteração de *layout* da linha:

Figura 42 – Alteração de *layout* proposta

Fonte: Autor

A alteração proposta de inclusão de *buffers* não é aplicável à última máquina de cada trecho, pois as mesmas já são providas com os *buffers* originalmente concebidos para a linha ou possuem saída livre de peças, no caso da última máquina do sistema. A Figura 43 apresenta o novo *layout* proposto para a linha:

Figura 43 – *Layout* proposto para redução do consumo de energia elétrica

Fonte: Autor

Mantendo-se a execução da simulação com objetivo de produção máxima da linha em um período compreendido por 48 horas, os principais dados de manufatura obtidos para esta proposta são detalhados nas tabelas 19 e 20, assim como um comparativo em relação aos resultados obtidos pelos demais cenários já apresentados. Para efeitos de análise, estes cenários serão assim representados nos comparativos apresentados posteriormente:

- a) cenário 4: sem implementação de ações para controle de energia;
- b) cenário 5: implementação de ações de controle de energia, através da aplicação de múltiplos estados de operação com transição automática.

Tabela 19 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 6 (1)

Estação	Qtde. Produzida (un.)			Tempo em processamento (%)		
	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4
M1	4318	4316	4336	73,35	73,32	73,65
M2	4317	4315	4335	61,04	61,01	61,29
M3	4316	4314	4334	73,12	73,08	73,42
M4	4293	4290	4310	71,90	71,85	72,19
M5	4292	4289	4309	69,83	69,78	70,10
M6	4291	4288	4308	72,00	71,95	72,28
M7	4290	4287	4307	71,04	70,99	71,32
M8	4194	4191	4206	68,94	68,89	69,13
M9	4193	4190	4205	72,75	72,70	72,96
M10	4192	4189	4204	68,83	68,78	69,03
M11	4191	4188	4203	64,96	64,91	65,15
M12A	2118	2116	2117	70,86	70,80	70,83
M12B	2050	2053	2057	69,43	69,50	69,64
M13	4167	4168	4173	72,36	72,36	72,45
M14	4167	4167	4172	65,71	65,71	65,79
M15	4150	4150	4155	74,01	74,01	74,10
M16	4149	4149	4154	66,88	66,88	66,97
M17	4148	4148	4154	69,58	69,58	69,67
M18	4147	4147	4153	67,21	67,21	67,29

Fonte: Autor

Tabela 20 – Dados obtidos de manufatura para o cenário 6 (2) (continua)

Estação	Tempo aguardando peças (%)			Tempo em bloqueio (%)		
	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4
M1	13,26	9,05	0,00	6,46	10,71	19,45
M2	36,39	26,50	16,30	1,08	11,01	20,97
M3	13,26	13,30	5,55	0,00	0,00	7,46
M4	21,20	19,56	9,75	2,63	4,38	14,42
M5	24,75	24,31	13,70	1,24	1,74	12,08
M6	25,18	25,50	16,76	2,37	2,11	10,59
M7	25,49	26,26	17,93	1,79	1,07	9,15
M8	17,24	17,16	9,82	10,01	10,18	17,43
M9	22,86	20,81	13,38	0,01	2,13	9,34
M10	29,70	27,61	21,22	1,37	3,52	9,75
M11	30,04	30,11	24,68	1,46	1,46	6,79

						(conclusão)
M12A	11,50	9,62	6,49	11,02	12,99	16,37
M12B	14,60	11,20	8,01	8,61	11,98	15,26
M13	19,78	16,06	13,42	0,00	3,74	7,08
M14	28,38	28,39	25,46	0,00	0,00	3,71
M15	20,81	13,48	13,41	0,01	7,36	7,37
M16	25,57	23,64	23,63	0,04	1,99	1,97
M17	30,22	28,28	28,37	0,01	1,96	1,97
M18	30,56	30,56	30,66	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor

Em um período de 48 horas, obteve-se o mesmo resultado final de produção do cenário 5 – 4147 peças produzidas –, fazendo também com que os tempos de processamento entre estes cenários sejam bastante similares.

Em contrapartida, observa-se resultante da estratégia de instalação de *buffers* unitários um incremento significativo nos tempos de espera por peças, assim como uma redução dos tempos de bloqueio em comparação ao cenário 5. Isto deve-se à alocação das peças bloqueadas por falhas em *buffers* e consequente transição das máquinas correspondentes para o estado *standby*. Desta forma, as parcelas de tempo anteriormente atribuídas ao bloqueio das máquinas devido à uma falha em equipamento posterior do mesmo trecho – modo operacional –, foram realocadas como períodos de espera por peças, nos quais os equipamentos assumem o modo de economia de energia elétrica programado.

Os tempos de energização e desenergização dos equipamentos alocados em modo de *standby* perfizeram entre 0,04% e 0,87% do total, não sendo expressivos para uma análise particular. A alocação dos equipamentos em modo *standby* variou de 16 a 457 ciclos, a depender do trecho analisado.

Os tempos de manutenção não sofreram alterações em relação aos estudos de simulação anteriores, não sendo, desta forma, apresentados neste cenário para comparação.

Conforme já apresentado nos cenários 4 e 5, há grande variação de alocação nos *buffers* durante todo o período analisado. Devido à manutenção deste comportamento, este item não será explorado na análise deste cenário.

No que tange ao comportamento energético da linha, o gráfico apresentado na Figura 44 demonstra o consumo de energia elétrica de cada um dos estados de energia dos equipamentos em relação ao total consumido pelos mesmos neste novo cenário proposto.

Figura 44 – Consumo de energia elétrica por equipamento no cenário 6

Consumo de Energia Elétrica - Equipamentos Seleccionados

Fonte: Autor

As tabelas 21 e 22 apresentam também os valores absolutos de consumo individual nos diferentes estados de cada equipamento e o consumo global da linha, assim como um comparativo em relação aos resultados de comportamento energético obtidos pelos cenários 4 e 5 anteriormente analisados:

Tabela 21 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 6 (1)

Estação	Consumo Total (kWh)			Consumo proces. (kWh)		
	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4
M1	539,58	553,62	584,93	492,89	492,68	494,91
M2	824,30	878,33	967,79	703,17	702,87	706,03
M3	523,77	523,56	568,60	491,35	491,13	493,35
M4	554,46	560,32	630,74	517,71	517,35	519,77
M5	901,53	903,91	1039,20	837,90	837,31	841,24
M6	918,10	915,86	1065,41	863,95	863,34	867,38
M7	474,22	471,73	548,90	443,26	442,95	445,02
M8	559,27	559,53	622,01	496,33	495,98	497,76
M9	442,70	448,48	505,00	419,06	418,76	420,26
M10	503,14	510,07	588,75	462,54	462,20	463,87
M11	742,20	741,87	855,51	654,77	654,31	656,67
M12A	925,82	936,56	992,15	816,33	815,57	815,98
M12B	898,23	918,39	983,54	799,89	800,67	802,26
M13	514,97	527,62	581,36	486,26	486,27	486,87
M14	710,25	705,17	811,71	630,84	630,84	631,62
M15	450,91	472,26	505,99	426,27	426,28	426,81
M16	508,99	519,72	565,70	449,44	449,44	450,01
M17	505,75	512,44	590,46	467,58	467,57	468,15
M18	536,46	536,63	620,40	483,92	483,92	484,52
TOTAL	12034,65	12196,07	13628,15	10943,46	10939,44	10972,48
TOTAL (%)		100,0%		90,93%	89,69%	80,51%

Fonte: Autor

Tabela 22 – Dados obtidos de energia elétrica para o cenário 6 (2)

Estação	Consumo operacional (kWh)			Consumo <i>standby</i> (kWh)		
	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 5	Cenário 4
M1	26,18	43,26	78,42	8,91	6,08	0,00
M2	88,53	153,67	257,61	28,45	17,64	0,00
M3	0,83	0,79	52,44	8,78	8,83	0,00
M4	15,16	22,53	104,42	15,04	13,89	0,00
M5	24,11	27,49	185,60	27,16	26,75	0,00
M6	24,01	21,83	196,93	29,04	29,59	0,00
M7	13,74	11,00	101,37	14,71	15,27	0,00
M8	44,13	44,70	117,75	12,31	12,35	0,00
M9	5,18	12,33	78,53	12,25	11,18	0,00
M10	23,73	32,27	124,88	16,87	15,60	0,00
M11	56,62	56,48	190,30	22,27	22,54	0,00
M12A	78,34	91,74	158,01	12,99	11,09	0,00
M12B	61,39	84,41	160,87	16,54	12,90	0,00
M13	3,84	18,81	82,65	13,03	10,70	0,00
M14	47,40	40,99	167,99	19,91	21,24	0,00
M15	6,49	31,90	71,80	10,77	6,70	0,00
M16	36,01	48,63	103,19	11,04	9,15	0,00
M17	21,55	29,31	122,31	16,62	15,56	0,00
M18	32,67	32,56	132,44	16,43	16,71	0,00
TOTAL	609,91	804,70	2487,51	313,12	283,77	0,00
TOTAL (%)	5,07%	6,60%	18,25%	2,60%	2,33%	0,00%

Fonte: Autor

Através da análise dos dados obtidos, pode-se verificar que a estratégia proposta foi capaz de reduzir o consumo energético global da linha, assim como o consumo individual referente ao estado operacional quando comparado aos demais cenários analisados. A redução destes índices está atrelada à alocação dos equipamentos em estado *standby*, quando da ocorrência de falha em uma máquina posterior do mesmo trecho. O consumo referente ao estado processamento foi bastante similar ao verificado no cenário 5, justificado pelo número semelhante de peças produzidas em ambas as situações, incluindo-se as unidades ainda em processo. Uma comparação do consumo energético da linha nos três cenários simulados é apresentada na Figura 45.

Figura 45 – Comparativo de consumo de energia elétrica entre cenários

Fonte: Autor

O pequeno incremento verificado no consumo em modo *standby* em comparação ao cenário 5 refere-se justamente à alocação das peças bloqueadas por falhas em *buffers* e consequente transição das máquinas correspondentes para o estado *standby*.

Neste contexto, a partir dos dados apresentados é possível avaliar a eficiência energética do cenário proposto, estabelecendo-se como parâmetro de comparação os resultados alcançados pelos cenários anteriormente analisados. Inicialmente, faz-se necessária a avaliação da quantidade consumida de energia elétrica por peça produzida:

$$\text{Consumo [kWh]}/\text{unidade} = \frac{\text{Total consumido [kWh]}}{\text{Total de unidades produzidas}} \rightarrow \frac{12034,65 \text{ kWh}}{4147 \text{ un.}} \rightarrow$$

$$\text{Consumo [kWh]}/\text{unidade} = 2,902 \text{ kWh/un.} \quad (16)$$

O consumo por peça produzida no cenário proposto foi, respectivamente, 11,55% e 1,33% menor em relação aos cenários 4 e 5, conforme comparativo deste indicador apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Comparativo de consumo energético por unidade produzida

Fonte: Autor

Com o objetivo de prover uma análise mais abrangente, o *Lean Energy Indicator*, proposto por May et al. (2015), será também aplicado em comparação aos cenários anteriores, indicando o quão o consumo geral de energia elétrica está sendo canalizado para as atividades que geram valor no cenário proposto.

$$\text{Lean Energy Indicator} = \frac{\text{Energia que gera valor (processamento)}}{\text{Energia total}} \rightarrow \frac{10943,46 \text{ kWh}}{12034,65 \text{ kWh}} \rightarrow$$

$$\text{Lean Energy Indicator} = 0,9093 \quad (17)$$

O índice calculado para o *Lean Energy Indicator* do cenário proposto é o melhor obtido dentre os três cenários avaliados que consideram a ocorrência de paradas não planejadas na linha. Isto é justificado pelas ações de controle de energia implementadas neste cenário, as quais diminuem consideravelmente o consumo em um momento de bloqueio, no qual os equipamentos não executam atividades de processamento que geram valor. A Figura 47 apresenta um comparativo deste indicador entre os três cenários propostos.

Figura 47 – Comparativo de índices do *Lean Energy Indicator* para os cenários propostos

Fonte: Autor

As ações de controle de energia implementadas neste cenário, as quais diminuem consideravelmente o consumo em situações de bloqueio, propiciaram o alcance do maior índice calculado para o *Lean Energy Indicator* dentre os cenários avaliados. Desta forma, o percentual não aplicado para as atividades que geram valor é de 9,07%, o que representa uma melhoria de 53,46% e 12,03%, respectivamente, em relação aos cenários 4 e 5 propostos anteriormente.

Visando ainda prover uma análise comparativa completa entre os cenários apresentados, torna-se também fundamental a apresentação de indicadores financeiros. Neste aspecto, propõe-se o confronto do custo energético anual relativo ao consumo de energia elétrica da linha em referência, considerando-se operação em 3 turnos de 08 horas, 365 dias por ano. As premissas para o cálculo de indicadores financeiros já descritas no item 4.1.3 serão aplicadas neste comparativo. A Tabela 23 demonstra os dados considerados, assim como o custo anual de consumo calculado para cada cenário analisado:

Tabela 23 – Comparativo do custo energético anual entre cenários

Cenário	Consumo diário (kWh)	R\$/ kWh Horário de Ponta	R\$/ kWh Fora da Ponta	Bandeira Tarifária (R\$/kWh)	Custo energético anual (R\$)
Cenário 4	6814,075	0,77915	0,52202	0,045	1.465.228,87
Cenário 5	6098,035				1.311.258,96
Cenário 6	6017,325				1.293.903,91

Fonte: Autor

Conforme apurado, o cenário 6 apresenta o menor custo energético anual absoluto de consumo dentre os cenários propostos. No entanto, faz-se também necessário traçar um paralelo entre o ganho financeiro obtido pela redução de consumo através das estratégias de controle de energia propostas e as perdas de produção verificadas em cada cenário. O gráfico da Figura 48 propõe esta análise, tomando-se como linhas de base o custo energético total referente ao consumo de energia elétrica e a quantidade de peças produzidas no cenário 4, o qual não contemplava ações de controle de energia.

Figura 48 – Redução de consumo X Produção anual

Fonte: Autor

Pode-se observar que, embora proporcione o maior valor de redução no custo energético anual referente ao consumo de energia elétrica dentre os cenários propostos – R\$ 171.324,96 –, o cenário 6 deixa também de produzir 1095 unidades anuais em relação ao cenário 4. Comparativamente ao cenário 5, as ações adicionais de controle de energia implementadas nas situações de bloqueio das máquinas propiciam uma redução complementar de R\$17.355,05 no custo energético anual referente ao consumo de energia elétrica, contando-se com a mesma produção final de 756.827 peças.

Em relação à demanda de energia, assim como nos demais cenários avaliados, a demanda máxima persiste em 329 kW, sendo alcançada nos períodos nos quais todas as máquinas estão em atividade de processamento. O comportamento da demanda de potência elétrica durante todo o período em análise para o cenário proposto é apresentado na Figura 49:

Figura 49 – Comportamento da demanda de potência elétrica no cenário 6
Demanda de Potência Elétrica

Fonte: Autor

Confrontando-se o comportamento da demanda de potência elétrica em relação aos demais cenários, pode-se verificar um desempenho muito similar ao apurado no cenário 5, com grande variação de demanda durante todo o período analisado. No entanto, observam-se pontualmente ocorrências com menor potência em relação ao cenário anterior, sendo estas decorrentes da atuação das ações de controle de energia adicionais implementadas, as quais alocam os equipamentos em estado *standby* nas situações de bloqueio e, conseqüentemente, reduzem momentaneamente a demanda necessária para operação do sistema.

Desta forma, através dos resultados obtidos observa-se que a aplicação de estratégias de controle de energia em situações de bloqueio por falha, em conjunto com a tomada de ações de acordo com o estado da máquina anterior e o conteúdo dos *buffers* já implementada no cenário 5, proporciona o alcance dos melhores índices para os indicadores analisados dentre as situações simuladas. Em relação aos cenários 4 e 5, a redução no consumo observada representa uma economia anual de R\$ 171.324,96 e R\$ 17.355,05, respectivamente. Em contrapartida, deve-se levar em consideração na aplicação deste cenário uma redução de produção de 0,144% do total produzido, também observada no cenário 5, assim como o custo de implementação e operação dos *buffers* unitários propostos. Neste contexto, a análise da viabilidade de aplicação destas ações conjuntas de controle de energia passa necessariamente pela análise da rentabilidade obtida por peça produzida e também pelo investimento necessário para a instalação e manutenção dos *buffers* unitários na linha, os quais variam de acordo com a indústria avaliada, não sendo alvo deste estudo.

De qualquer forma, visualiza-se que as estratégias propostas são plenamente aplicáveis para os casos nos quais é admissível a redução do consumo de energia elétrica em detrimento à pequenas perdas de produção. Adicionalmente, observa-se que a alteração do *layout* e da composição da linha propiciou incremento dos indicadores de eficiência energética do sistema, corroborando assim a existência de oportunidades de intervenção em sistemas existentes cujo objetivo seja o melhor aproveitamento dos recursos de energia elétrica disponíveis.

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresenta diversos cenários de simulação aplicados como meios de avaliação para a redução do consumo de energia elétrica em uma linha de produção de blocos de motores. A inserção desta nova variável ao planejamento tradicional da produção permite a análise conjunta dos dados de manufatura e do comportamento energético da linha mediante às ações propostas.

A partir dos dados obtidos através dos estudos de simulação foram estabelecidos e calculados indicadores de eficiência energética, cuja utilização permite um comparativo da eficácia dentre as diferentes ações sugeridas.

Para os cenários nos quais a linha em referência não contempla a ocorrência de paradas não planejadas, a proposição de ações de controle para o ajuste automático dos estados de energia dos equipamentos poderia propiciar uma redução do consumo global de energia elétrica de 2,7%, sem afetar a quantidade final produzida, confirmando assim a viabilidade de aplicação das estratégias propostas nos casos nos quais os sistemas produtivos possuem operação sincronizada, sem distúrbios aleatórios e que perdas finais de produção não são admissíveis.

Nos cenários que consideram a linha de produção em regime de operação real, ou seja, preveem também a ocorrência de paradas não planejadas que afetam o sincronismo do sistema durante o período produtivo, a aplicação de ações de controle para a transição automática entre os estados de energia dos equipamentos poderia propiciar uma redução do consumo global de energia elétrica de 10,5%, com uma queda de produção de 0,144%.

Pode-se também verificar que a alteração do *layout* e composição da linha pode potencializar o incremento dos indicadores de eficiência energética do sistema. Ao incluir novos *buffers* unitários na linha, visando desbloquear o sistema em determinadas situações, pode-se obter uma redução do consumo global de energia elétrica de 11,69%, mantendo-se a perda de produção em 0,144%. Isto demonstra que as estratégias propostas são plenamente aplicáveis para os casos nos quais é admissível a redução do consumo de energia elétrica em detrimento à pequenas perdas de produção, assim como corrobora a existência de oportunidades de intervenção em sistemas existentes, cujo objetivo seja o melhor aproveitamento dos recursos de energia elétrica disponíveis.

Os resultados obtidos demonstram ainda que a simulação de diferentes ações de controle permite não apenas a obtenção de um diagnóstico apurado da situação atual das instalações, como também possibilita o uso mais eficiente dos recursos disponíveis através da

identificação de oportunidades de incremento em indicadores de eficiência energética, mesmo em sistemas de produção já bem concebidos originalmente.

Adicionalmente, observa-se também que a utilização de equipamentos com múltiplos estados de energia permite minimizar o consumo em períodos nos quais os equipamentos encontram-se ociosos ou com produção excedente, potencializando assim os resultados obtidos através da implementação de ações de controle voltadas ao gerenciamento de energia elétrica. Além disso, os conceitos e análises para incremento de eficiência energética apresentados neste estudo não tem sua aplicação limitada à linha de produção selecionada, possibilitando assim o emprego dos mesmos em outros sistemas de produção discretos, com configuração serial.

Uma contribuição indireta deste trabalho refere-se também ao melhor aproveitamento da capacidade instalada no horário de ponta, proporcionando maior segurança no fornecimento de energia elétrica. Considerando-se que atualmente os sistemas de geração e transmissão de energia operam próximos de seus limites durante o período de ponta, a redução do consumo de energia elétrica pelo setor industrial diminui a carga total destes sistemas, reduzindo desta forma a necessidade de investimentos imediatos tanto na expansão do parque gerador, quanto nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

De maneira complementar, a simulação através de um ambiente de manufatura digital mostrou-se como uma ferramenta eficaz de análise do comportamento energético da linha, possibilitando a apresentação da mensuração de possíveis resultados provenientes de investimentos em eficiência energética. Uma dificuldade encontrada na ferramenta utilizada foi a ausência de maior integração entre o módulo de análise de energia e as demais aplicações presentes na solução de manufatura digital. Esta integração proveria informações sobre o comportamento energético dos elementos que compõem um equipamento em sua fase de concepção, através de bibliotecas e padrões de objetos pré-definidos, assim como estabeleceria interface direta com o módulo de comissionamento virtual, detalhando o consumo de energia elétrica dentro dos ciclos de operação dos equipamentos, funcionalidade a qual não está disponível atualmente.

A aplicação proposta posiciona também a sustentabilidade ambiental como uma nova perspectiva de aplicação para os conceitos de manufatura digital, possibilitando assim a indução de uma mudança cultural nas organizações, a qual engloba a adoção de métricas sustentáveis no planejamento da produção em complemento às variáveis tradicionais de análise, como custo, tempo e qualidade.

Ademais, o estudo apresentado não apenas busca alternativas para diminuição do uso de energia elétrica e respectivos custos atrelados. Este trabalho contribui também como suporte à aplicação de práticas sustentáveis nas organizações, buscando-se motivar a análise de indicadores de eficiência energética com o objetivo de propor novas soluções para a redução do consumo de energia elétrica em instalações industriais. Desta forma, observa-se que além das potenciais vantagens econômicas competitivas propiciadas, há também uma contribuição ambiental relevante, verificada por meio da utilização mais eficiente dos recursos energéticos e, por consequência, diminuindo os impactos ambientais decorrentes das atividades de manufatura.

Por fim, o estudo apresentado não leva em conta o perfil de enquadramento tarifário da instalação fabril, ou seja, há o mesmo tratamento para os dados de consumo e demanda de potência elétrica independentemente da hora do dia – ponta ou fora de ponta. Desta forma, propõe-se o desenvolvimento de trabalhos futuros que propiciem a análise de oportunidades de implantação de ações de gerenciamento de energia voltadas especificamente à redução do consumo e da demanda de potência elétrica no horário de ponta, período no qual o custo de energia elétrica é maior para o segmento industrial. Outra relevante extensão deste estudo decorre da delimitação de escopo apresentada, a qual considera a manufatura de um modelo de produto único na linha, sem operações de *setup* durante o período produtivo. Desta forma, é possível ampliar a análise realizada considerando-se a manufatura de múltiplos produtos e a ocorrência de operações de *setup* na linha de produção proposta.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; BRAUN, S.; SCHRAML, P. Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 251-256, 2015.

ABELE, E.; PANTEN, N.; MENZ, B. Data Collection for Energy Monitoring Purposes and Energy Control of Production Machines. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 299-304, 2015.

ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Tarifas de Energia**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 09 maio 2015.

AES ELETROPAULO. **Bandeiras Tarifárias**. Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/educacao-legislacao-seguranca/informacoes/conteudo/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

ALEXANDER, C. W. Discrete event simulation for batch processing. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2006, Augusta. **Anais...** Augusta: Lovers Lane, p. 1929-1934, 2006.

ANEEL. **Tarifa média de fornecimento de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550>>. Acesso em: 17 maio 2014.

ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758>>. Acesso em: 09 maio 2015.

BANDEIRANTE ENERGIA. **Manual de orientação aos consumidores: critérios de contratação e tarifas aplicadas**. Mogi das Cruzes, 2004. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-escelsa/informacoes/grandes-clientes/normas-e-manuais/>>. Acesso em: 04 mar. 2015.

BANKS, J. et al. **Discrete-event system simulation**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

BARRÔNIO, S. **Desenvolvimento de modelos de simulação computacional para análise e melhorias de sistemas produtivos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

BEGO, A.; LI, L.; SUN, Z. Identification of reservation capacity in critical peak pricing electricity demand response program for sustainable manufacturing systems. **International Journal of Energy Research**, v. 38, n. 6, p. 728-736, 2014.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modeling and Simulation: Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BUNSE, K.; SACHS, J.; VODICKA, M. Evaluating energy efficiency improvements in manufacturing processes. In: VALLESPER, B.; ALIX, T. (Eds.). **Advances in production management systems: new challenges, new approaches**. Bordeaux: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 19-26.

BUNSE, K. et al. Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6-7, p. 667–679, Apr./May 2011.

CÁCERES, M. S. J.; CASTILHO, R. A.; ROSÁRIO, J. M. Proposta metodológica para a formação profissional na área de manufatura digital-PLM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 19-30.

CASTRO, W. **Provérbios de Santo Agostinho**. 1. ed. [S.l.]: 101 Seleções, 2014.

CAUCHICK MIGUEL, P. A. (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CHANG, Q. et al. Energy saving opportunity analysis of automotive serial production systems (March 2012). **Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 2, p. 334-342, 2013.

CHRYSSOLOURIS, G. et al. Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 223, n. 5, p. 451-462, May 2009.

CHRYSSOLOURIS, G.; PAPAKOSTAS, N.; MAVRIKIOS, D. A perspective on manufacturing strategy: Produce more with less. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 1, n. 1, p. 45–52, 2008.

CNI. **Matriz energética**: cenários, oportunidades e desafios. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://admin.cni.org.br/portal/data/pages/FF808081310B1CBB01314F2266E27002.htm>>. Acesso em: 30 ago. 2014.

CNI. **Eficiência energética na indústria**: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://admin.cni.org.br/portal/data/files/00/FF808081234E24EA0123627A07156F8E/Eficiencia.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2014.

COPEL. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/tarifas>>. Acesso em: 14 nov. 2015.

COSTA, M.A.B. **Um modelo baseado em conhecimento para simular rebanhos de bovinos de corte**. 2004. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

DE CARLI, P. C.; DELAMARO, M. C.; SALOMON, V. A. P. Identificação e priorização dos fatores críticos de sucesso na implantação de fábrica digital. **Produção**, v. 20, n. 4, p. 549-564, 2010.

DECANIO, S. J.; WATKINS, W.E. Investment in energy efficiency: do the characteristics of firms matter? **The Review of Economics and Statistics**, v. 80, n. 1, p. 95-107, Feb. 1998.

DUARTE, R. N. **Simulação computacional: análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças**. 2003. 235 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2003.

DUFLOU, J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 61, n. 2, p. 587-609, 2012.

DYER, C. H. et al. Enabling technologies for industrial energy demand management. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4434-4443, 2008.

EICHHAMMER, W. Industrial energy efficiency. In: CLEVELAND, C. J. (Org.), **Encyclopedia of Energy**. New York: Elsevier, 2004, p. 383-393.

ELETROBRAS. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LibroBombeamento.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2015.

ELETROBRAS. **Manual de tarifação da energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual de Tarif En El - Procel _EPP - Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual+de+Tarif+En+El+-+Procel+_EPP+-+Agosto-2011.pdf)>. Acesso em: 09 maio 2015.

EPE. **Balanco energético nacional 2013: ano base 2012**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 30 maio 2015.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 30 maio 2015.

FAGUNDES, A. M. et al. Estudo de caso: análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno CNC, baseado na metodologia RCM (Reliability Centered Maintenance), aplicado a área de manutenção industrial. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABEPRO, 2011. p. 45-57.

FERNANDEZ, M.; LI, L.; SUN, Z. “Just-for-Peak” buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 1, p. 178-184, 2013.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?** Rio de Janeiro: Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8F4EBC426A014EC144C72E2A51&inline=1>>. Acesso em: 04 maio 2014.

FIRJAN. **Perspectivas do custo da energia elétrica para a indústria no Brasil em 2014 e 2015**. Rio de Janeiro: Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8F4EBC426A014EC083B76C35AD&inline=1>>. Acesso em: 09 maio 2015.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?** Disponível em: <<http://www.quantocustaenergia.com.br>>. Acesso em: 09 maio 2015.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas:** com aplicações em Arena. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FRIGERIO, N.; MATTA, A. Energy-Efficient Control Strategies for Machine Tools With Stochastic Arrivals. **Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 1, p. 50-61, 2015.

GAMA, E. B. **Benefícios obtidos na colaboração entre sistemas MES e sistemas de manufatura digital do PLM - diagnóstico.** 2011. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2011.

GAMA, E. B. **O que é manufatura digital?** São Paulo: CADware, 2013.

GAMA, E. B.; COSTA, M. A. B. Benefícios obtidos com a integração dos sistemas MES e a manufatura digital do PLM. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, Salvador. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2009. p. 31-40.

GALITSKY, C.; WORRELL, E. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the vehicle assembly industry:** an energy star guide for energy and plant managers. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

GHANI, U.; MONFARED, R.; HARRISON, R. Real time energy consumption analysis for manufacturing systems using integrative virtual and discrete event simulation. **International Journal of Energy Engineering**, v. 2, n. 3, p. 69-73, Aug. 2012.

GODOI, J. M. A. **Eficiência energética industrial:** um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

GRIEVES, M. **Product lifecycle management:** driving the next generation of lean thinking. New York: McGraw-Hill, 2006.

HADDAD, J. Uso eficiente da energia: dos incentivos regulatórios recentes até a atual lei de eficiência energética. **Revista Brasileira de Energia**, v. 9, n. 1, p. 107-118, 2002.

HARREL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation using Promodel.** 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

HEILALA, J. et al. Simulation-based sustainable manufacturing system design. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008, Austin. **Anais...** [S.I.]: IEEE, 2008. p. 1922-1930.

HERRMANN, C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems: concept and application. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 60, n. 1, p. 45–48, 2011.

IANNONI, A.P.; MORABITO, R. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**, v.9, n.2, p.107-128, 2002.

IEA - International Energy Agency. **International energy outlook 2013**. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)>. Acesso em: 19 set. 2015.

IRREK, W.; THOMAS, S. **Der EnergieSparFonds für Deutschland**. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, 2006.

JACCARD, M.; NYBOER, J.; FOGWILL, A. How big is the electricity conservation potential in industry. **The Energy Journal**, v. 14, n.2, p. 139-156, 1993.

KELTON, W.D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKY, D. A. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, 1998.

KOHL, J.; SPRENG, S.; FRANKE, J. Discrete event simulation of individual energy consumption for product-varieties. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 517-522, 2014.

KUEHN, W. Digital factory: integration of simulation enhancing the product and production process towards operative control and optimisation. **International Journal of Simulation**, v. 7, n. 7, p. 27-29, 2006.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

LEITE, F. C. **Modelamento da eficiência energética para o gerenciamento sustentável no setor industrial pela medição e verificação**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

MAGABLEH, G. M. A dynamic replenishment system for integrating supply chain functions. **Maritime Economics & Logistics**, v. 9, n. 1, p. 52-66, 2007.

MANGIAPELO, L. B. S. **Avaliação da eficiência energética em sistemas de iluminação predial: estudo de casos em dois hipermercados na cidade de Campo Grande – MS**. 2012. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2012.

MAY, G. et al. Energy management in production: a novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. **Applied Energy**, v. 149, p. 46-61, 2015.

MEDAU, J.C. **Análise de capacidade do lado aéreo de aeroportos baseada em simulação computacional: aplicação ao aeroporto de São Paulo – Congonhas**. 2011. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MEYERS, F. E.; STEPHENS, M. P.; **Manufacturing facilities design and material handling**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 04 maio 2014.

MOREIRA, S. G. **Estratégias de simulação para análise da eficiência energética em sistema de bombeamento monitorado via supervisor**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2008.

MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 1, n. 2, p. 105-116, 2008.

ÖREN, T. I. Simulation and reality: the big picture. **International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing**, v.1, p.1-25, 2010.

PALM, J.; THOLLANDER, P. An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. **Applied Energy**, v. 87, n. 10, p. 3255-3261, 2010.

PARK, C. et al. Energy consumption reduction technology in manufacturing: a selective review of policies, standards, and research. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 10, n. 5, p. 151-173, Dec. 2009.

PAUL, R. J.; KULJIS, J. Problem solving, model solving, or what? In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, Baltimore. **Anais...** Baltimore: Lovers Lane, p. 353-358, 2010.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. **Introduction to simulation using SIMAN**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PEREIRA, C. R.; COSTA, M. A. B. Um modelo de simulação de sistemas aplicado à programação da produção de um frigorífico de peixe. **Revista Produção Online**, v. 12, n. 4, p. 972-1001, 2012. Disponível em: <<http://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/994/962>>. Acesso em: 01 maio 2014.

PIDD, M.. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

PONTES, H. L. J. **Desenvolvimento de um ambiente para simulação da manufatura baseado em features e realidade virtual**. 2012. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ROBINSON, S. Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? **Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 6, p. 619-629, 2005.

SAKURADA N.; MIYAKE D. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 25-43, Jan./Mar. 2009.

SALES, C. J. D. Energia, fontes renováveis e etanol. In: SIMPÓSIO INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA NO BRASIL, 1., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: Instituto Acende Brasil, 2008. p. 1-15.

SALONITIS, K.; BALL, P. Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 634-639, 2013.

SARDIANOU, E. Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 13, p. 1416-1423, Sep. 2008.

SCHMITT, R.; BITTENCOURT, J. L.; BONEFELD, R. Modelling machine tools for self-optimisation of energy consumption. In: HESSELBACH, J.; HERRMANN, C. (Eds.). **Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing**. Braunschweig: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 253-257.

SEOW, Y.; RAHIMIFARD, S. A framework for modeling energy consumption within manufacturing systems. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 3, P. 258–264, 2011.

SILVA, J. E. A. R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. 2006. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2006.

SHAHBAZPOUR, M.; SEIDEL, R. H. A. Using sustainability for competitive advantage. In: CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 13., 2006, Leuven. **Anais...** Leuven: Academy of Science, Engineering and Technology, 2006. p. 48-60.

SHANNON, R. E. Introduction to the art and science of simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 30., 1998, Washington. **Anais...** Washington: IEEE, 1998. p. 7-14.

SLANSKY, D. Gaining competitive advantage through digital manufacturing. **ARC Insights**, v. 2006, p. 1-4, 2006.

SOLDING, P.; THOLLANDER, P. Increased energy efficiency in a swedish iron foundry through use of discrete event simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2006, Monterey. **Anais...** [S.I.]: IEEE, 2006. p. 1971-1976.

SOLDING, P.; PETKU, D. Applying energy aspects on simulation of energy-intensive production systems. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, Orlando. **Anais...** [S.I.]: IEEE, 2005. p. 1428-1432.

SUN, Z. et al. Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 84-93, 2014.

SUN, Z.; LI, L. Opportunity estimation for real-time energy control of sustainable manufacturing systems. **Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 1, p. 38-44, 2013.

THIEDE, S. et al. 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.

TOCHER, K. D. **The art of simulation**. London: The English Universities, 1967.

UM, I.; HYEONJAE, C.; LEE, H. The simulation design and analysis of a flexible manufacturing system with automated guided vehicle system. **Journal of Manufacturing Systems**, v.28, p.115-122, 2009.

VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Automated energy monitoring of machine tools. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 59, n. 1, p. 21–24, 2010.

WANG, S.C. et al. Explore of the hospital management of simulation education learning model. **Journal of Engineering Technology and Education**, v.7, n.4, p.640-649, 2010.

WEI, J., LEUNG, S.C.H. A simulation modeling and analysis for RFID-enabled mixed product loading strategy for outbound logistics: a case study. **Computers & Industrial Engineering**, v.61, p.209–215, 2011.

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.

WENZEL, S.; JESSEN, U.; BERNHARD, J. Classifications and conventions structure the handling of models within the digital factory. **Computers in Industry**, v. 56, n. 4, p. 334–346, May 2005.

WESTKÄMPER, E. Digital manufacturing in the global era. In: _____. **Digital enterprise technology: perspectives and future challenges**, [S.l.]: Springer, 2007. cap. 1, p. 3-14.

WY, J. et al. A data-driven generic simulation model for logistics-embedded assembly manufacturing lines. **Computers & Industrial Engineering**, v.60, p.138–147, 2011.

ZHOU, L. et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, part 5, p. 3721–3734, Jan. 2016.