GUILHERME FRANCIS FAGUNDES SORTINO

**Metodologia para aplicação de automação em equipamentos
industriais hidráulicos de grande porte para melhoria da eficiência
energética e ganhos de sustentabilidade**

**São Paulo
2017**

Catlogação-na-publicação

SORTINO, GUILHERME FRANCIS FAGUNDES

Metodologia para aplicação de automação em equipamentos industriais hidráulicos de grande porte para melhoria da eficiência energética e ganhos de sustentabilidade / G. F. F. SORTINO -- São Paulo, 2017.
135 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Máquinas Hidráulicas (Metodologia) 2.Máquinas Hidráulicas (Automação) 3.Eficiência Energética 4.Sustentabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

GUILHERME FRANCIS FAGUNDES SORTINO

**Metodologia para aplicação de automação em equipamentos
industriais hidráulicos de grande porte para melhoria da eficiência
energética e ganhos de sustentabilidade**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em Ciências

**São Paulo
2017**

GUILHERME FRANCIS FAGUNDES SORTINO

Metodologia para aplicação de automação em equipamentos industriais hidráulicos de grande porte para melhoria da eficiência energética e ganhos de sustentabilidade

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de concentração:
Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Livre-Docente
Sérgio Luiz Pereira

**São Paulo
2017**

*À minha esposa Cristiane e aos nossos
filhos Anna Paula e Guilherme, razões do
meu viver.*

AGRADECIMENTOS

Para que a presente tese fosse elaborada foi necessário contar com o apoio e a contribuição de algumas pessoas que, direta ou indiretamente, incentivaram a sua realização. Os erros, eventualmente nela presentes, contudo, são de responsabilidade exclusivamente minha, o seu autor.

Em primeiro lugar, eu agradeço a Deus, por iluminar-me com sua infinita bondade, oferecendo-me clareza de espírito para conduzir-me pelos caminhos nem sempre simples da vida profissional e do mundo acadêmico, onde seguimos aprendendo.

Agradeço em particular ao Professor Dr. Sérgio Luiz Pereira, meu Orientador, que comigo compartilhou o seu tempo e o seu valioso conhecimento, possibilitando-me encontrar, por assim dizer, o “caminho das pedras” na elaboração e na conclusão deste trabalho.

Sou especialmente grato aos membros da banca do exame de qualificação desta tese, Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote (FEI) e Prof. Dr. Walter Gomes da Cunha Filho (PUC/SP), que, através de críticas e observações sempre construtivas me ajudaram a avançar e me aprofundar em determinados pontos do trabalho.

Também, sou muito grato aos colaboradores da MBB, Siemens e Voith e especialmente a Carolina Cassiano, Felipe Cavani Vizzone Correa, Larissa Di Giorgio, Mauro de Souza Paraiso, Ronaldo Monteiro, Friedrich Guthier entre muitos outros, que desde o princípio de meus contatos com essas empresas reservaram-me sua especial atenção.

Sou grato, de um modo muito especial à minha família, à Cristiane, minha esposa, e a nossos filhos, Anna Paula e Guilherme, que tiveram paciência comigo ao longo dos períodos onde estudar, analisar e escrever subtraíram-nos momentos importantes de convivência, mas que eu espero ainda poder repor e compensá-los nos anos que virão.

Gostaria, por fim, de registrar que as pessoas e instituições que por razões de espaço eu omito nestas linhas certamente têm seus lugares reservados em meu pensamento e terão, para todo e sempre, a minha mais elevada gratidão.

“Existem duas avenidas pelas quais as opiniões são recebidas pela alma e que são seus dois poderes principais: o entendimento e a vontade”

Blaise Pascal 1623-1662 ^(*)

^(*) Blaise Pascal, estudioso pioneiro das prensas hidráulicas, in: **A Arte da Persuasão** (sem página e data definidas).

RESUMO

Este Trabalho de pesquisa de doutorado apresenta o desenvolvimento e a aplicação da MAAMEES - Metodologia para Aplicação em Equipamentos Industriais Hidráulicos de Grande Porte para Melhoria da Eficiência Energética e Ganhos de Sustentabilidade. A tese parte do contexto experimentado pelo mundo corporativo e por toda a sociedade, ao longo das últimas décadas, em que, ao lado de transformações tecnológicas de grande impacto, a sociedade viu aumentar a preocupação com o meio ambiente e com a limitação dos recursos naturais e fatores de produção. Conceitos como o de “sustentabilidade” e o de “desenvolvimento sustentável”, vem se consolidando enquanto empresas de variados portes e setores aderiam a uma postura de maior respeito aos ecossistemas e, sobretudo, de maior respeito aos seres humanos, sejam eles seus clientes e colaboradores ou membros de comunidades nem sempre relacionadas às suas cadeias de produção e de valor. Nos últimos anos, cristalizou-se também o modelo da Ecoeconomia, em que o processo decisório empresarial, governamental e das instituições sociais passa a ser moldado pela preocupação com a limitação dos fatores de produção e pela busca de garantias de que as gerações atuais e futuras tenham sua sobrevivência e qualidade de vida asseguradas. Nesse novo contexto, eficiência energética e o uso responsável de recursos operacionais, incluindo equipamentos, materiais e serviços humanos, revelam-se como princípios a nortear as decisões executivas e esta tese procura demonstrar que o uso da TA e da TI em equipamentos industriais de grande porte pode resultar em ganhos energéticos que representam não apenas redução de custos para as empresas, com impactos em sua competitividade, mas, sobretudo, uma importante contribuição ambiental, impactando na sustentabilidade com benefícios para toda a sociedade. A tese apresenta os fundamentos da MAAMEES e sustenta suas conclusões com análises práticas realizadas em equipamentos industriais, onde o estudo da sua aplicação na automação de prensas hidráulicas mostrou que podem ocorrer economia energética e redução de custos operacionais, com a empresa elevando sua contribuição para um meio ambiente mais equilibrado.

Palavras-chave: Automação. Eficiência energética. Metodologia. Sustentabilidade. Máquinas hidráulicas.

ABSTRACT

This PhD research paper presents the development and application of MAAMEES - Methodology for Application in Large-Scale Hydraulic Industrial Equipment for Enhancement of Energy Efficiency and Sustainability Gains. The thesis is part of the context experienced by the corporate world and society throughout the last decades, in which, alongside technological transformations of great impact, society has increased concern about the environment and the limitation of natural resources and factors of production. Concepts such as "sustainability" and "sustainable development" have been consolidating as companies of various sizes and sectors have adhered to a position of greater respect for ecosystems and, above all, greater respect for human beings, whether they are their clients or employees or members of communities not always related to their production and value chains. In recent years, the Ecoeconomics model has crystallized, in which the decision-making process of business, government, and social institutions is shaped by the concern with the limitation of factors of production and the search for guarantees that the present and future generations have their survival and quality of life assured. In this new context, energy efficiency and the responsible use of operational resources, including human equipment, materials and services, are the guiding principles for executive decisions and this thesis seeks to demonstrate that the use of AT and IT in large industrial equipment can result in energy gains that represent not only a reduction of costs for companies, but also an important environmental contribution, impacting sustainability with benefits for the whole society. The thesis presents the fundamentals of MAAMEES and supports its conclusions with practical analyzes carried out in industrial equipment, where the study of its application in the automation of hydraulic presses has shown that energy savings and reduction of operational costs can occur, with the company increasing its contribution to a more balanced and sustainable environment.

Keywords: Automation. Energy efficiency. Methodology. Sustainability. Hydraulic machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos ilustrativo de um processo produtivo genérico.....	19
Figura 2 - Sistema de transformação industrial	20
Figura 3 - Processo no contexto industrial.....	22
Figura 4 - Processos de conversão energética	24
Figura 5 - Sistema energético genérico	26
Figura 6 - Exemplo de prensa industrial moderna	34
Figura 7 - Esquema de uma prensa hidráulica	36
Figura 8 - Fotografia de bloco de válvulas de uma máquina hidráulica	37
Figura 9 - Prensa em posição para realizar processo de formação	38
Figura 10 - Funcionamento do cilindro principal de uma prensa hidráulica	39
Figura 11 - Deslocamento versus tempo de uma prensa hidráulica	41
Figura 12 - Etapas de um programa de uso racional de energia.....	45
Figura 13 - Prensa hidráulica e diagrama de funcionamento	47
Figura 14 - Balanço energético de uma prensa hidráulica.....	48
Figura 15 - Fluxo de uma máquina hidráulica convencional.....	50
Figura 16 - Gráfico da pressão de uma máquina hidráulica convencional	51
Figura 17 - Disponibilidade de potência da máquina hidráulica convencional.....	51
Figura 18 - Necessidade de potência útil da máquina hidráulica.....	52
Figura 19 - Gráfico de potências fornecida e útil da máquina hidráulica	52
Figura 20 - Desenvolvimento da ciência, engenharia e TA na indústria.....	56
Figura 21 - Cinco níveis da automação industrial.....	58
Figura 22 - Facilitadores da integração de TI e TA no contexto industrial	59
Figura 23 - Inibidores da integração de TI e TA no contexto industrial.....	59
Figura 24 - Modelo de sistema de gerenciamento de energia para ISO 50001.....	61
Figura 25 - Sistema de gerenciamento de energia para ISO 50001.....	62
Figura 26 - Gerenciamento de energia para a norma ISO 50001.....	64

Figura 27 - Fluxograma para aplicação da MPCTAI.....	71
Figura 28 - Etapas para Aplicação da MAPEAS.....	73
Figura 29 - Parte A do fluxograma da MAAMEES - Macro etapa I análise <i>ex-ante</i> 75	
Figura 30 - Parte B do fluxograma da MAAMEES - Macro etapa II implementação e macro etapa III análise ex-post	76
Figura 31 - Arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica genérica após a solução STA.....	78
Figura 32 - Detalhamento da arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica com a solução STA	79
Figura 33 - Fotografia da Solução STA no experimento de Rutesheim, Alemanha...	80
Figura 34 - Arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica genérica com a solução SEM	81
Figura 35 - Fotografia da prensa Ciola 60t (fabricada em 1976)	85
Figura 36 - Fluxograma de operação da prensa Ciola 60t (fabricada em 1976).....	87
Figura 37 - Fotografia da placa do motor da prensa Ciola 60t.....	88
Figura 38 - Esquema de instalação do medidor e registrador de potência elétrica 89	
Figura 39 - Gráfico da amostra de dados obtidos de medições em 19/10/2015.....	91
Figura 40 - Gráfico da amostra de dados obtidos de medições em 19/10/2015.....	93
Figura 41 - Fluxograma de controle da máquina aplicada a SEM	95
Figura 42 - Fotografia da prensa de 4.000 kN	102
Figura 43 - Configuração dos pistões da prensa de 4.000 kN.....	102
Figura 44 - Fluxograma de operação da prensa de 4.000 kN	103
Figura 45 - Esquema de instalação do medidor e registrador de potência elétrica 105	
Figura 46 - Fluxograma de operação da prensa de 4.000 kN com STA.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de energia	30
Tabela 2 - Fatores de conversão para unidades de energia	31
Tabela 3 - Principais unidades de potência e sua equivalência em watt.....	31
Tabela 4 - Principais elementos e funções de uma prensa industrial moderna.....	34
Tabela 5 - Detalhes de tempos e eventos de uma prensa hidráulica.....	42
Tabela 6 - Rendimentos energéticos dos componentes de uma prensa hidráulica	48
Tabela 7 - Metodologias relevantes para o desenvolvimento de sistemas.....	65
Tabela 8 - Dados obtidos de medições em 19/10/2015	90
Tabela 9 - Dados obtidos de medições em 19/10/2015	92
Tabela 10 - Cenários possíveis de economia de energia com a implantação da SEM	96
Tabela 11 - Resultados reais e simulados na máquina estudada	98
Tabela 12 - Demonstração de resultados para cenários simulados.....	99
Tabela 13 - Análise de viabilidade pelo período de payback simples	100
Tabela 14 - Fluxos de caixa simulados e resultados do VPL e TIR	100
Tabela 15 - Capacidade nominal no tempo por tipo de peça	104
Tabela 16 - Resultados de eficiência energética com aplicação da STA	108
Tabela 17 - Resultados de consumo energético, redução de custos e payback com aplicação da STA	109
Tabela 18 - Possíveis descontos a serem concedidos pelo fabricante	110
Tabela 19- Cenários, receitas e investimentos para aplicação da STA	111
Tabela 20 - Fluxos de caixa para os cenários de aplicação da STA	111
Tabela 21 - Payback simples para os diferentes cenários de aplicação da STA	112
Tabela 22 - VPL e TIR para os diferentes cenários de aplicação da STA.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARIS	<i>Architecture of Integrated Information Systems</i>
BSC	<i>Balanced Score Card</i>
CIMOSA	<i>Computer Integrated Manufacturing - Open Systems Architecture</i>
COBIT	<i>Control Objectives for Information and Related Technology</i>
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve and Control
FCS	Fatores Críticos de Sucesso
GIM	<i>GRAI Integrated Methodology</i>
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i> /Iniciativa Global de Relatórios
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> /Organização Internacional para a Padronização
MAAMEES	Metodologia para aplicação de automação em equipamentos hidráulicos industriais de grande porte para melhoria da eficiência energética e ganhos de sustentabilidade
MBB	Mercedes Benz do Brasil
MES	<i>Manufacturing execution systems</i> /Sistemas de execução em manufatura
MPCTAI	Convergência de Tecnologia de Automação e Informação
ONU	Organização das Nações Unidas
PB	Período de <i>payback</i>
PDAI	Plano Diretor de Automação e Informação
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PERA	<i>Purdue Enterprise Reference Architecture</i>
SEM	Solução de efetividade máxima
SGE	Sistema de gerenciamento energético
STA	Solução tecnológica avançada
TA	Tecnologia da automação
TI	Tecnologia da informação
TIR	Taxa Interna de retorno
VPL	Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. PROCESSOS, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, RENDIMENTO, RENDIMENTO OPERACIONAL E RENDIMENTO GLOBAL.....	18
3. FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS	32
3.1 Fundamentos, Histórico e Aplicações de Máquinas Hidráulicas.....	32
3.2 Arquitetura de Máquinas Hidráulicas	33
3.3 Estimativa do Gasto Energético de Máquinas Hidráulicas.....	43
3.3.1 Energia consumida calculada pelo balanço energético	43
3.3.2 Energia consumida na operação das máquinas hidráulicas.....	49
3.3.3 Energia global consumida: rendimento global	53
4. METODOLOGIAS DE PROJETO E MAAMEES	55
4.1 Contexto Industrial e o Impacto de TI e TA.....	55
4.2 Tópicos Gerais sobre a Norma ISO 50001: Padronização da Gestão da Eficiência Energética	60
4.3 Metodologias para Suporte na Implementação de Sistemas.....	64
4.4 Estrutura, Conceituação e Aplicação da MAAMEES	74
4.4.1 Macro Etapa I: análise ex-ante	76
4.4.2 Macro Etapa II: Implementação.....	82
4.4.3 Macro Etapa III: análise ex-post	83
5. APLICAÇÃO DA MAAMEES.....	84
5.1 Aplicação da MAAMEES na Fábrica da MBB em São Bernardo do Campo	84
5.1.1 Macro Etapa I: análise ex-ante	84
5.1.2 Identificação da máquina e oportunidade de melhoria de eficiência energética.....	84
5.1.3 Estudo da máquina em operação e seu processo de trabalho.....	86
5.1.4 Estudo dos indicadores econômicos da máquina.....	87
5.1.5 Estimativa do consumo energético baseada exclusivamente na operação da máquina.....	88
5.1.6 Medição do consumo energético da máquina em seu processo de trabalho ...	88
5.1.7 Análise do consumo medido e tomada de decisão entre SEM e STA.....	94
5.1.8 Projeto da SEM e estimativa do novo consumo	94
5.1.9 Análise econômica da aplicação da MAAMEES com a SEM	97
5.2 Aplicação da MAAMEES por Simulação em Caráter Experimental em Planta de Cliente Voith na Alemanha	101
5.2.1 Macro Etapa I: análise ex-ante	101
5.2.2 Identificação da máquina e oportunidade de melhoria de eficiência energética.....	101
5.2.3 Estudo da máquina em operação e seu processo de trabalho.....	102

5.2.4	Estudo dos indicadores econômicos da máquina.....	103
5.2.5	Estimativa do consumo energético baseada exclusivamente na operação da máquina.....	104
5.2.6	Medição do consumo energético da máquina em seu processo de trabalho .	105
5.2.7	Análise do consumo medido e tomada de decisão entre SEM e STA.....	106
5.2.8	Projeto da STA e estimativa do novo consumo	106
5.2.9	Implantação da MAAMEES com a STA, medição do consumo e análise dos resultados	108
5.2.10	Análise econômica da aplicação da MAAMEES com a STA.....	108
6.	CONCLUSÃO.....	114
	REFERÊNCIAS.....	117
	ANEXO A.....	128

1. INTRODUÇÃO

As transformações na economia mundial nos últimos setenta anos tiveram substancial impacto sobre a indústria, pois o padrão tecnológico desenvolvido no ambiente econômico que se convencionou chamar de pós Segunda Guerra Mundial, ou Era da Terceira Revolução Industrial, levou à modernização e à automatização dos processos produtivos, acelerando os sistemas de fabricação e permitindo aumentos da quantidade produzida e a diversificação dos produtos (VASCONCELLOS et al., 2013).

Esse padrão tecnológico pós Segunda Guerra Mundial, que prevaleceu praticamente até a última década do século XX, já dentro da Era da Nova Economia, tinha como foco, sobretudo, a quantidade produzida, com menor importância às questões de eficiência e desempenho, especialmente eficiência energética, já que não havia até esse período uma preocupação com a escassez dos fatores de produção (PARRISH, 2008a e 2008b).

Equipamentos industriais de grande porte, como as prensas hidráulicas, tiveram sua tecnologia praticamente mantida desde que foram criados, sendo que alguns deles, como as prensas mecânicas, sendo as mesmas desde o século XVII, apenas agregando novos insumos energéticos e controles de segurança que foram desenvolvidos, em particular, nesse período pós Segunda Guerra Mundial.

As prensas hidráulicas, cujos princípios operacionais, baseados em Blaise Pascal (1623-1662), foram desenvolvidos ao longo do século XIX, praticamente nada mudaram em termos de operações e medidas de eficiência, mantendo a sua estrutura funcional praticamente intacta até que, bem recentemente, passaram a receber os impactos tecnológicos e conceituais da Era da Nova Economia (CAUS, 1615; SCHULER, 2014).

Nesse período de transformações pelo qual vêm passando a economia, o último quarto de século, particularmente, foi bem peculiar, pois testemunhou acontecimentos oriundos de transformações organizacionais, administrativas e tecnológicas que impactaram o planeta e tiveram também grande efeito nos sistemas produtivos e sobre os equipamentos de fabricação. Essas mudanças, conforme o trabalho de Pereira e Simão Filho (2014) ocorrem em um contínuo e podem ser analisadas do ponto de vista global, ao mesmo tempo social,

organizacional, econômico e empresarial e também do ponto de vista da conscientização sobre o uso de fatores produtivos, da noção de escassez e da mudança de postura, tanto da sociedade quanto das empresas, sobre as limitações do meio ambiente, fazendo com que se desenvolvesse o conceito de sustentabilidade (PEREIRA; SIMÃO FILHO, 2014; GOLDEMBERG; PRADO, 2014).

Após os anos 1990, com o estabelecimento e a consolidação da Era da Nova Economia e, mais recentemente, da Era da Sociedade da Informação é possível ver a gênese de uma abordagem original, denominada “Ecoeconomia”, apresentada por Pereira e Simão Filho (2014), fundamentada nas propostas de Georgescu-Roegen, Herman Daly et al., feitas originalmente nos anos 1970, onde demonstram que a sociedade e a economia vêm passando por etapas evolutivas, quase sempre de caráter organizacional e tecnológico, que promovem mudanças que afetam a própria forma de organização econômica e também os equipamentos físicos integrantes dos processos industriais. Alteram-se, inclusive, os processos decisórios de tal modo que se incorporam, no limite, a noção de que se busca permanentemente “a melhoria da eficiência de todos os processos produtivos” com o sistema econômico privilegiando em essência o ser humano (p. 15).

Dentro deste contexto, o conceito de sustentabilidade, que é fruto também de um processo crescente de consciência e de preocupação com os sistemas ambientais, e que foi desenvolvido, tal qual a Ecoeconomia, a partir dos anos 1970, adquire importância ímpar e se coloca como objetivo central a ser alcançado.

Gore (2009), menciona que depois das experiências humanas de viagens ao espaço nos anos 1960 e 1970, em que o planeta Terra pôde ser avistado do alto, em sua totalidade, tornou-se clara a noção de limitação dos recursos planetários, a tal ponto que a Organização das Nações Unidas (ONU) passou a propor, desde então, encontros para debater a preocupação com os limites de recursos e o respeito com o meio ambiente.

Os conceitos de “desenvolvimento sustentável” e de “sustentabilidade”, utilizados e difundidos pela primeira vez em 1987, no chamado Relatório Brundtland, elaborado para a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, órgão criado em 1983 pela Assembleia das Nações Unidas, ganham seu lugar, primeiro no ambiente austero dos encontros governamentais, e depois - após o encontro Rio 92, igualmente promovido pela ONU - também no âmbito empresarial, passando a ter

importância quando se decide por investimentos, sobretudo, em equipamentos industriais (GORE, 2009).

A Ecoeconomia destaca que esse processo de consciência e de preocupação com o meio ambiente, amplamente incorporado pelas empresas modernas, permite, por exemplo, que se conclua que a própria termodinâmica tradicional, empregada pelos equipamentos industriais de grande porte, está em “oposição à Economia Clássica, demonstrando o caráter finito dos recursos naturais com o comprometimento da sobrevivência humana e dos seres vivos” (PEREIRA; SIMÃO FILHO, 2014, p. 106).

Assim, projeta-se sobre o ambiente empresarial, especialmente na passagem para o século XXI, uma preocupação cada vez maior com os ecossistemas, com a limitação dos fatores de produção e com a eficiência energética, de tal modo que o uso racional de energia passa a ser seriamente considerado no processo decisório empresarial, primeiro para os equipamentos e máquinas leves e flexíveis, e, depois, para os equipamentos industriais de grande porte, como as prensas hidráulicas e os equipamentos de estampa (SCHULER, 2014).

A presente tese de doutorado, partindo desse contexto de transformações, propõe uma abordagem metodológica e tecnológica de emprego da tecnologia da automação (TA) para o aumento da eficiência energética de máquinas hidráulicas de grande porte e uso industrial. Para tanto, além de aspectos técnicos relevantes para o processo de tomada de decisão, realiza uma análise empírica para justificar os resultados alcançados.

A metodologia proposta, que recebeu o nome de Metodologia para a Aplicação de Automação em Equipamentos Industriais de Grande Porte para Melhoria de Eficiência Energética e Ganhos de Sustentabilidade (MAAMEES), é apresentada neste trabalho dos pontos de vistas teórico e conceitual e também empírico, e se constitui em uma ferramenta de engenharia que permite a identificação, análise e projeto do emprego de TA para obter índices mais elevados de eficiência energética em máquinas hidráulicas industriais de grande porte.

Os princípios do emprego da MAAMEES se fundamentam na eliminação de significativa parcela percentual da energia despendida sem a efetiva transformação em trabalho útil que a operação tradicional das máquinas hidráulicas de grande porte realizam. Para tanto esta tese de doutorado está estruturada em 6 capítulos.

O capítulo 2 apresenta processos, eficiência energética, rendimento, rendimento operacional e rendimento global.

O capítulo 3 apresenta os fundamentos das máquinas hidráulicas.

O capítulo 4 apresenta a metodologia de aplicação de automação para ganhos de eficiência energética em prensas hidráulicas.

O capítulo 5 apresenta a aplicação da metodologia - análise de aspectos práticos.

O capítulo 6 apresenta a conclusão e as recomendações, e sumariza as potencialidades da adoção prática da metodologia.

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas.

2. PROCESSOS, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, RENDIMENTO, RENDIMENTO OPERACIONAL E RENDIMENTO GLOBAL

Este capítulo apresenta os conceitos de processo, eficiência energética, rendimento, rendimento operacional e rendimento global. Pereira (2009, p.20) conceitua processo partindo da ideia de que a observação do universo “permite concluir que, a cada instante, uma infinita gama de eventos e transformações físicas e biológicas, dos mais diversos tipos de elementos, acontece simultaneamente no espaço e no tempo”. Desde os primórdios do planeta Terra, segundo o autor, os homens aprenderam a observar a natureza e a buscar reproduzir, recriar, orientar, controlar, transformar e adaptar os mais diferentes tipos de eventos e transformações dos elementos, em função das suas necessidades. Desta forma os homens tiveram que iniciar o desenvolvimento dos primórdios da ciência e da tecnologia procurando criar ferramentas, sistemas e métodos artificiais com a intenção de alcançar seus objetivos de transformação e exercendo uma influência relativa nos elementos do mundo a sua volta. Assim, o homem criou e tornou-se agente de uma ampla gama de processos nas suas relações com a natureza e a cultura.

Para Pereira (2009, p.20), “existem diversas definições acadêmicas empregadas pelos mais diversos setores produtivos da sociedade para o termo processo”. Ele cita, por exemplo,

Ritzman e Krajewski (2004, p. 3), para quem um processo é uma atividade que parte de um ou mais insumos, transforma-os e lhes agrega valor, criando um ou mais produtos (ou serviços) para os clientes. O tipo de processo pode variar. Em uma fábrica, por exemplo, um processo primário seria a transformação física ou química de matérias-primas em produtos. Existem, porém, muitos processos não relacionados a manufatura em uma fábrica, como o processamento de pedidos, o acerto de compromissos com os clientes e o controle do processo.

No dicionário Aurélio¹, o termo processo é um “substantivo masculino que significa: ato de proceder, de ir por diante, sucessão de estados ou de mudanças, modo por que se realiza ou executa uma coisa; método, técnica”.

De acordo com Ogata (2003, p.2),

(...) processo é uma operação ou desenvolvimento natural que evolui progressivamente, caracterizado por uma série de mudanças graduais que se sucedem umas em relação às outras, de um modo relativamente estável e objetivando um particular resultado ou meta; ou uma operação artificial ou

¹ O novo dicionário Aurélio da língua portuguesa, 2ª ed. 1986, p. 1395.

voluntaria, que se constitui por uma série de ações controladas ou movimentos sistematicamente dirigidos objetivando um particular resultado ou meta.

Portanto, segundo Pereira (2009),

(...) processo é toda operação a ser controlada (...) e os processos produtivos são compostos de um ou diversos subprocessos. Todo processo produtivo impacta e é impactado pela sociedade. Assim sendo, todo processo produtivo pode ser situado dentro de um determinado setor da atividade econômica.

O autor ilustra o modelo relacional entre as macros variáveis de entradas e saídas de um processo produtivo genérico. Observa-se que este modelo representa uma dependência hierárquica entre o meio ambiente, sociedade humana, atividade econômica e os diversos setores da economia, representado pelas macros variáveis de sustentabilidade. Este modelo também ilustra, de forma genérica conceitual, os efeitos de sustentabilidade provocados pelas saídas e operações de um processo produtivo no meio ambiente, na sociedade humana e na atividade econômica.

Figura 1 - Diagrama de blocos ilustrativo de um processo produtivo genérico

Fonte: Pereira (2009)

Conforme ilustrado na Figura 1, vê-se que nos processos produtivos em geral o resultado direto é a produção de bens e serviços executados que geram subprodutos, lixo e sucata. Os processos produtivos, conforme Pereira (2009), demandam:

(...) seis categorias de macro variáveis de entrada: energia, matérias-primas, recursos humanos, tecnologia, decisões e distúrbios. As macros variáveis de entrada - energia, matérias-primas e recursos humanos – são classificadas como macro variáveis físicas porque são mais facilmente reconhecidas e mensuradas pelos métodos clássicos da engenharia e da administração. Já as macros variáveis - tecnologia, decisões e distúrbios - são classificadas como macro variáveis estratégicas, porque, embora também sejam determinantes nos índices de competitividade mercadológica e de performance do produto ou serviço, sempre são plenamente identificadas, classificadas, analisadas e mensuradas de forma clara e não ambígua pelos gestores ou responsáveis pelo processo.

Pereira (2009) assevera que “alguns autores denominam os processos produtivos como sendo processos de transformação” e cita Slack, Chambers e Johnston (2002) para quem “um processo de transformação é caracterizado por um conjunto de recursos de entradas empregado para transformar algo ou ser transformado em saídas de bens ou serviços”. Ainda, segundo os autores, qualquer atividade produtiva pode ser vista conforme o modelo entrada-transformação-saída, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema de transformação industrial

Fonte: Pereira (2009), baseado em Slack, Chambers e Johnston (2002)

Este formato de modelação dos processos está baseado na separação conceitual entre recursos de transformação e recursos a serem transformados. A primeira categoria, recursos de transformação, engloba a infraestrutura física sistêmica ou metodológica empregada direta e indiretamente por um determinado processo. A segunda categoria, a dos recursos a serem transformados, engloba todo tipo de entrada no sistema que será trabalhado, manipulado, transportado ou transformado”.

Pereira (2009) nota que:

(...) o modelo proposto por Slack, Chambers e Johnston (2001) não ilustra o lixo e a sucata produzidos por qualquer processo de transformação. Entretanto, deve-se considerá-los como inerentes, em maior ou menor escala, em qualquer atividade de transformação. Nesta forma de modelar em um processo de transformação de uma operação de uma linha aérea, por exemplo, o avião, a tripulação de bordo, a equipe de terra são as entradas classificadas como recursos de transformação. Já os passageiros e as cargas são entradas classificadas como recursos a serem transformados. Observe-se que, nesta sistematização, o recurso humano é classificado, em parte, como recurso de transformação e, em parte, como recurso a ser transformado, pois o processo de transformação é definido como o de transportar pessoas e cargas enquanto que, as saídas do processo são, justamente, o transporte de pessoas e de cargas efetuados. Em uma montadora automobilística, os recursos de transformação como máquinas, ferramentas e pessoas realizam operações nas peças e materiais recebidos. O processo de transformação é definido como sendo o de produzir veículos. As saídas do processo são os veículos produzidos. As duas maneiras de modelar os processos apresentados, conforme as figuras 1 e 2, são distintas e, de certa forma, complementares. As mesmas também demonstram que não existe na ciência acadêmica a adoção de definições únicas e universais para a engenharia de automação, a engenharia de produção e a ciência da administração. É comum até, em algumas situações específicas, haver divergências semânticas e conceituais entre a cultura acadêmica e as múltiplas culturas adotadas por diversas empresas”. Segundo o autor citado, “observa-se que alguns gestores empresariais ou mesmo engenheiros costumam denominar de processo a sua infraestrutura dos sistemas de transformação. Entretanto (...), o termo processo produtivo é mais adequado para designar o que se faz e como são processadas as seis variáveis de entrada para efetuarem a produção de um determinado produto ou serviço.

Processo, portanto, é uma operação continuada, com início, meio e fim, que serve para compor uma atividade com o objetivo de alcançar resultados esperados dentro de parâmetros de controle. Neste sentido, processos industriais são atividades continuadas que podem ser muito variadas, abrangendo procedimentos em indústrias mecânicas e que também podem incluir etapas de transformações físicas, elétricas e químicas em passos determinados com o objetivo de produzir uma peça ou peças, que podem ser em baixas quantidades e mesmo em elevados volumes.

Segundo Prado Filho (2016), processos que podem ser de negócios, jurídicos, ou industriais, configuram-se como sendo “*uma sequência de tarefas (ou atividades) que ao serem executadas transformam insumos em um resultado com valor agregado*”. A Figura 3 ilustra o posicionamento do processo no contexto industrial.

Derivado do conceito de processo tem-se alguns conceitos adicionais, como o conceito de gestão por processos que consiste na “interação entre as várias atividades que são realizadas nas empresas pelos diversos departamentos”, de tal modo que “há o envolvimento de várias áreas e até a formação de equipes específicas” na realização de atividades e tarefas dentro da organização industrial (PRADO FILHO, 2016).

Figura 3 - Processo no contexto industrial

Fonte: Prado Filho (2016)

Um segundo conceito importante também ligado a processo é o de eficiência energética, que “*consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia*”, muitas vezes exigindo-se a “*modernização de equipamentos e de processos no sentido de reduzirem seu consumo*”. Sabe-se que parcela significativa de energia é empregada na fabricação dos produtos que utilizamos em especial os produzidos com alumínio, aço, cimento, papel e vidro, de modo que “*ações de reuso e reciclagem (...) economizam energia*” (CELPE, 2016).

A busca da eficiência energética, contudo, de forma organizada e racional tem exigido que se estude o desempenho de máquinas, equipamentos, e mesmo de toda uma unidade industrial com seus múltiplos processos, para identificar oportunidades de economia energética, o que pede muitas vezes a atualização tecnológica e modernização de equipamentos e processos.

O terceiro conceito relevante no contexto de processo industrial é o de rendimento, o qual é explicado pela “proporção entre o resultado obtido e os meios que tenham sido usados para obtê-lo”. Nas organizações industriais, conforme ABESCO (2016),

(...) rendimento designa o resultado que se obtém por cada unidade realizada numa atividade”, seja uma operação de máquina, ou um departamento industrial, ou no desempenho do trabalho realizado por um único indivíduo. Quando associado à energia, rendimento “é o quociente entre a energia que se obtém do seu funcionamento útil e a energia utilizada durante o processo.

Uma máquina hidráulica convencional ao realizar um trabalho sobre uma peça, a sua energia mínima teórica é a necessária unicamente para a realização desse trabalho. Essa energia mínima ideal, porém, para que esteja disponível na posição de trabalho e no momento exato para a sua realização, requer quantidades maiores de energia. A energia total requerida pela máquina hidráulica é a resultante em

função de seu projeto funcional e da tecnologia empregada no mesmo, assim como da qualidade e eficiência dos componentes utilizados para a sua construção.

Parcelas da demanda energética da máquina são fundamentais para o processo e parte desta são perdas. A energia excedente, que é disponibilizada no sistema se apresenta na forma de calor, vibrações indesejáveis, ruídos, vazamentos, entre outras, conforme as características específicas de cada projeto (SIEMENS, 2015).

Em adição às perdas naturais de funcionamento de cada um dos componentes existentes nas máquinas hidráulicas convencionais, uma parcela importante da perda de energia nas máquinas hidráulicas é a que se dissipa nos períodos de espera e também nos intervalos entre os ciclos de trabalho efetivo.

O estudo do balanço energético das máquinas hidráulicas convencionais permite que esta parcela de energia perdida seja avaliada, buscando se compreender como isto ocorre e como pode ser possível minimizar estas perdas, considerando-se para isto alternativas e recursos tecnológicos atuais disponíveis, incluindo neste processo a análise de viabilidade para a aplicação de formas mais intensivas da TA e eventualmente de componentes agregados de maior eficiência compatíveis.

Para que se possa avançar neste objetivo, é oportuna uma breve revisão do conceito de energia.

Para estabelecer uma melhor compreensão do significado da expressão energia, encontra-se no “Dicionário Escolar da Língua Portuguesa” (ABL, 2008 p.494) a seguinte definição:

(e.ner.gi.a) s.f.1. (Fis.) Potencial que um corpo, uma substância ou um sistema físico tem de produzi movimento, superar resistências e efetuar alterações físicas. 2. Fig. Potência física; forças, vigor, vitalidade, disposição: uma boa alimentação proporciona energia ao atleta. 3. Fig. Potência moral; firmeza, empenho. O juiz atuou com energia naquele caso de corrupção. 4. Coloq. Luz, eletricidade: Com o temporal, minha casa ficou sem energia. || Energia calórica: energia encontrada nas proteínas, gorduras e carboidratos dos alimentos: O excesso de energia calórica leva à obesidade. Energia elétrica: (Eletr.) energia gerada por fontes naturais (sol, água, etc.) ou por outro tipo de energia (hidráulica, mecânica, etc.) que serve para iluminar locais ou colocar em funcionamento aparelhos elétricos entre outros usos. Energia nuclear (Fis.) energia obtida por meio de alterações do núcleo de um átomo; energia atômica: os raios x constituem uma forma de energia nuclear.

De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2015), energia se tornou um dos principais insumos necessários ao funcionamento da sociedade moderna, que

passou a depender dela para a criação de bens e o fornecimento de serviços, baseando-se para a sua obtenção em recursos naturais. Elevados padrões de vida, tanto quanto o desenvolvimento econômico são processos complexos e que tem seu denominador comum no fato de serem usuários intensivos de energia.

A energia pode se apresentar de muitas formas e uma característica das formas energéticas é sua possibilidade de conversão, com uma forma energética transformando-se em outra, o que pode ocorrer de maneira intencional ou também de maneira espontânea.

Figura 4 - Processos de conversão energética

Fonte: Pereira e Marques (2015)

A energia, apesar de não ser possível visualizá-la diretamente, se faz perceptível pelo que realiza, pelos seus efeitos. A energia não pode ser destruída, somente se pode transformá-la em outra forma de energia. É possível não fazer uso útil dela, quando se permite que ela seja transformada em calor, vibrações ou ruídos, transferindo-se e dispersando-se no meio ambiente. Fato é que a energia cria valor unicamente pelo que de útil se pode fazer com a sua aplicação.

Dado que a energia se transforma continuamente, expressões do tipo “sistemas ou métodos de geração de energia” ou mesmo “sistemas ou métodos consumidores de energia” não são as mais apropriadas, sendo mais correta a expressão “processos de conversão de energia” conforme se pode visualizar pela Figura 4.

Na Figura 4 estão apresentadas as principais modalidades de conversão entre as seis formas básicas de energia, onde é importante notar que, dentre estas, alguns processos foram desenvolvidos e aprimorados pelo homem enquanto outros ocorrem na natureza, como a transformação da luz solar em energia nas folhas das plantas, no processo da fotossíntese, e também a energia nas atividades orgânicas e musculares onde a energia química no organismo é convertida em força e movimento. É possível também observar o quão variados podem ser estes processos que têm por resultado a geração de energia térmica e também como a energia mecânica é parcela envolvida em distintos processos tecnológicos.

A Lei da Conservação da Energia, conforme visto na Equação 1, estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída:

$$\sum E_{\text{entra}} = \sum E_{\text{sai}} + \Delta E_{\text{sistema}} \quad (\text{Equação 1})$$

Esta Lei da Conservação da Energia, que também é conhecida como a primeira Lei da Termodinâmica, foi estabelecida por James Prescott Joule (1818-1889) e Julius Robert von Mayer (1814-1878) por volta de 1840. Ela tem grande importância pois permite que sejam realizados balanços energéticos, assim como a determinação de perdas, permitindo que fluxos energéticos sejam quantificados.

A perda é a parcela de energia que não é aproveitada em um sistema energético. Contida nestas perdas, uma parcela da energia pode eventualmente ser aproveitada desde que se utilizem atualizações tecnológicas e modificações nos processos, tornando possível que sejam evitadas ou mesmo minimizadas estas perdas no sistema em questão.

Em um sistema genérico, onde a energia é fornecida, e por ele transformada em produtos ou serviços desejados, existem parcelas de energia que são perdidas como representado na Figura 5.

Figura 5 - Sistema energético genérico

Fonte: Adaptado de Martins (2012)

O rendimento energético pode ser calculado como está representado na Equação 2.

$$\eta_{\text{energ}} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} \quad (\text{Equação 2})$$

A lei da dissipação da energia conforme descrita por William Thomson (1824-1907) se tornou básica e fundamental para os processos energéticos, estabelecendo que, em todos os processos reais, aonde aconteça a conversão energética, sempre haverá uma parcela de energia térmica sendo produzida, em adição à transformação energética desejada. Quanto maior a parcela desta energia que é convertida em energia térmica, quando a finalidade desejada do processo de conversão em estudo seja outra, maior será a parcela da energia desperdiçada na forma de calor (THOMSON, 1874).

Observe-se o que ocorre em sistemas como o dos freios por atrito, onde a energia cinética é convertida em calor, estes são processos onde se deseja transformar a energia mecânica em calor. Neste caso, a transformação pode ser total, na situação em que o veículo que estava em movimento é levado pelo seu sistema de freios até a parada completa. Porém, quando o que se deseja é a transformação contrária de energia térmica em energia mecânica, ou cinética, na forma de movimento, isto pode ser feito unicamente pela utilização de motores, e acontecerá de forma parcial, pois seguramente uma parte da energia que será utilizada do combustível sempre será convertida e dissipada na forma de calor.

É fato que existirão perdas térmicas inevitáveis nas conversões energéticas e que estas são somadas às demais perdas também inevitáveis que são resultado das limitações da tecnologia e da economia dos sistemas reais, sejam elas por atrito, ruído, vibrações, inércia, isolamento imperfeito, perdas de carga, entre outras. A Equação 3 apresenta relações que representam o rendimento energético em sistemas de transformação de energia.

$$\eta_{\text{energ}} = \frac{E_{\text{util}}}{E_{\text{consumida}}} = \frac{E_{\text{consumida}} - \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} \quad (\text{Equação 3})$$

Outro conceito relevante para a compreensão dos intercâmbios energéticos é o da entropia, que se aplica especialmente para os estudos do que ocorre em máquinas térmicas.

Segundo Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), as imperfeições nos processos de conversão energética determinam o incremento líquido da entropia no universo. A ideia conceitual de entropia é que esta é uma grandeza física que encontra sua definição dentro da área da termodinâmica (CLAUSIUS, 1851).

Desta forma uma quantidade de calor variável indicada por Q, sendo o calor trocado entre o sistema e a sua vizinhança, a variável T, sendo a temperatura absoluta do sistema em estudo, têm-se que em todo processo reversível resulta a integral da curva da Equação 4 que depende unicamente de seus estados inicial e final e é de forma independente do caminho seguido.

$$\frac{\delta Q}{T} > = < 0 \quad (\text{Equação 4})$$

Portanto se faz necessário existir uma função de estado do sistema, $S = f(P, V, T)$, onde S é a entropia, P é a pressão, V é o volume e T é a temperatura, cuja variação em um processo reversível entre os estados inicial e final pode ser obtido pela Equação 5.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (\text{Equação 5})$$

Quando Q é reversível a entropia física na forma clássica é dada pela Equação 6.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (\text{Equação 6})$$

Quando o calor é trocado de forma reversível ou também quando o processo é isotérmico este se dá conforme a Equação 7.

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde S é a entropia, $Q_{1 \rightarrow 2}$ a quantidade de calor trocado e T a temperatura, que neste caso é necessariamente medida em Kelvin (CLAUSIUS, 1851).

De forma coloquial, o significado da Equação 7 é: em processos reversíveis, quando um sistema termodinâmico evolui do estado 1 ao estado 2, a variação na sua entropia é igual à variação da quantidade de calor que é trocada (de forma reversível) dividida pela temperatura.

O fundamento de entropia é útil para que seja possível entender os conceitos das energias que são classificadas como energias nobres, pois entendido que o trabalho sempre é totalmente conversível em outra forma de energia e o calor de forma contrária, apresenta-se sempre limitado por perder invariavelmente uma parcela de energia ao ser convertido.

Uma energia é considerada nobre, quando ela pode ser convertida diretamente em trabalho, assim se pode deduzir que a energia térmica pertence a uma classe de energia que tem baixa qualidade para a sua conversão.

Considere-se a conversão de energia em um processo onde a temperatura se mantenha constante. Nesse caso, toda a energia é livre e pode ser convertida para realizar um trabalho útil, pois não há perda entrópica.

Uma reação química que gera eletricidade sem mudança alguma na temperatura associada também vai ser realizada sem perda entrópica alguma, que é como ocorre no funcionamento das células de combustível.

Isto é verdadeiro para todos os processos chamados isotérmicos.

Considere-se a fricção, a resistência elétrica ou alguma outra conversão de energia semelhante, que em algum lugar de seu processo está presente a liberação de calor, o impacto deste calor liberado é a parcela perdida que diminuirá a energia disponível total. Em outras palavras, esta liberação de calor reduzirá a parcela que pode ser convertida de forma útil, que é a parcela que pode efetivamente ser transformada e utilizada, parcela esta que pode ser chamada de exergia do sistema considerado.

Assim, o conceito de entropia é importante e se relaciona com a dissipação da energia, com as perdas que ocorrem em processos de conversão energética e a medição da entropia de um processo qualquer permite que a sua qualidade de conversão seja avaliada.

Dada a variação de entropia em um processo, esta se obtém pela Equação 8.

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)_{\text{rever}} + S_{\text{gerada}} \quad (\text{Equação 8})$$

Processos reais sempre se apresentam com imperfeições e perdas, o que implica que a sua entropia sempre tende a se incrementar. Assim, sempre que uma parcela potencial para produzir trabalho é perdida como calor, parte da energia é dissipada, ou seja, esta energia se degrada em qualidade (BORTONI et al., 2012).

Martins (2012) esclarece que existem duas abordagens distintas para se obter a conservação da energia: A primeira forma é pela ação humana, quando uma pessoa que foi apropriadamente instruída, demanda e recebe informações fidedignas que vão lhe permitir compreender e adotar um comportamento novo dentro de um contexto ou situação que são a partir de então alterados, permitindo a este indivíduo aderir a hábitos comportamentais renovados, revendo e alterando as suas atitudes e se aprimorando ao longo do tempo.

A segunda forma é a que se processa através de intervenções tecnológicas, que mediante análises e estudos, educação e treinamentos, profissionais, normalmente já com certo grau de qualificação técnica são inseridas em questões mais aprofundadas, como as alternativas e oportunidades técnicas para a melhora da eficiência energética e passam a partir daí a incluir em seu repertório de alternativas e possibilidades a utilização sistemática de novas metodologias, novos processos, novos sistemas, novas tecnologias, novos equipamentos, passando a poder por meio da sua contribuição deliberada, induzir e fazer realizar mudanças que reduzirão o consumo de energia de uma máquina, de uma instalação, de uma planta, de um sistema ou processo sem afetar ou comprometer os seus produtos finais.

O estudo dos sistemas produtivos existentes é fundamental para que se possa avaliar a sua eficiência energética. Equipamentos são das mais diversas origens, fabricações e procedências e para que seja possível a conversão entre as diferentes unidades utilizadas, existem fatores que permitem a conversão entre as unidades utilizadas para a medição da energia, algo fundamentalmente importante quando se analisam sistemas energéticos e que são apresentados nas Tabelas de 1 a 3.

Tabela 1 - Unidades de energia

Unidade	Símbolo	Equivalência em Joule (J)
Caloria	cal	4,187
Quilowatt-hora	kWh	$3,6 \times 10^6$
Tonelada equivalente de petróleo	tEP	$41,87 \times 10^9$
Terawatt-ano	TW-ano	$31,5 \times 10^8$
British Thermal Unit	Btu	$1,055 \times 10^3$
Barril de petróleo equivalente (159 litros)	bbl	$6,212 \times 10^6$
Metro cúbico de gás natural	m ³	$41,23 \times 10^3$

Fonte: Bortoni et al. (2012)

A eficiência energética nesta abordagem pode ser entendida como um conceito que também pode ser embasado em conteúdo tecnológico mediante aplicação de novas tecnologias em processos ou equipamentos existentes, a introdução ou a substituição por novos componentes, novas metodologias funcionais, novas programações de sistemas existentes nestes processos e que passam a funcionar a partir destas modificações demandando menos energia e os seus produtos e serviços resultantes são obtidos com menor consumo de energia elétrica em relação a situação existente anteriormente.

Tabela 2 - Fatores de conversão para unidades de energia

de » para	Multiplicar por				
	J	Btu	cal	kWh	tep
joule (J)	1,0	$947,8 \times 10^{-6}$	0,23884	$277,7 \times 10^{-9}$	$2,388 \times 10^{-11}$
British Thermal Unit (Btu)	$1,055 \times 10^3$	1,0	252,0	$293,07 \times 10^{-6}$	$2,52 \times 10^{-8}$
caloria (cal)	4,1868	$3,968 \times 10^{-3}$	1,0	$1,163 \times 10^{-6}$	10^{-10}
quilowatt-hora (kWh)	$3,6 \times 10^6$	3.412,0	$860,0 \times 10^3$	1,0	$8,6 \times 10^{-5}$
tonelada equivalente de petróleo (tep)	$41,87 \times 10^9$	$39,68 \times 10^6$	$10,0 \times 10^9$	$11,63 \times 10^3$	1,0

Fonte: Gallo e Milanez (1990) *apud* Martins (2012)

Em outras palavras, a utilização de equipamentos e processos de maior eficiência energética é uma das maneiras de que se dispõe para que sejam reduzidas as perdas e desperdícios no uso de energia.

Tabela 3 - Principais unidades de potência e sua equivalência em watt

Unidade	Símbolo	Equivalência em Watt (W)
Caloria por minuto	cal/min	$68,8 \times 10^{-3}$
Quilocaloria por hora	kcal/h	1,163
Cavalo-vapor (métrico)	CV	735,49
Horse power (inglês)	HP	746
British Thermal Unit por hora	Btu/h	0,293

Fonte: Bortoni et al. (2012)

Bortoni et al. (2012) esclarecem que para se viabilizar a promoção e a implementação da eficiência energética são necessários procedimentos que abrangem conceitos multidisciplinares, conceitos com suas origens na administração, na engenharia, na economia, na física entre outros campos da ciência, implicando no uso de técnicas e métodos que visam à redução de perdas na produção, no transporte, na armazenagem, na distribuição e na utilização energética.

A efetividade energética, em seu sentido de eficiência agregada à eficácia, deve ser o objetivo a ser alcançado em todas as etapas das atividades corporativas e em especial na operação de equipamentos e sistemas onde a energia é transformada em trabalho.

3. FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Este capítulo apresenta um panorama atual das máquinas hidráulicas em ambientes industriais, seus fundamentos, a arquitetura, sua operação e seus produtos, concluindo com um balanço e uma estimativa do seu gasto energético.

3.1 Fundamentos, Histórico e Aplicações de Máquinas Hidráulicas

Uma máquina é definida como um dispositivo ou ferramenta multipartes que utiliza energia para desempenhar uma função. Uma máquina ou prensa hidráulica utiliza energia proveniente de fluidos, com sua aplicação em engenharia destinando-se à geração, controle e transferência de potência (CIMM, 2015).

As origens das máquinas hidráulicas remontam aos estudos de Benedetto Castelli (1576-1643), um dos discípulos de Galileu Galilei (1564-1642), que publicou “Sobre as Medições das Aguas Correntes” em 1619, uma das fundações da moderna hidrodinâmica, e também em Blaise Pascal (1623-1662), que estudou fluidos hidrodinâmicos e hidrostáticos estabelecendo os princípios da hidráulica dos fluidos e inventando a prensa hidráulica.

A prensa hidráulica é uma máquina que utiliza para seu funcionamento os princípios descritos na Lei de Pascal, que estabelece que, dado um fluido contido, quando ocorre um aumento na pressão em qualquer ponto deste fluido, este aumento de pressão será exercido em todos os demais pontos do recipiente que o contém. Em outras palavras, um fluido incompressível tem a propriedade de transferir a pressão a que é submetido (OLIVEIRA; MORS, 2009).

Máquinas hidráulicas, como as prensas, tem em seu projeto o fluido hidráulico pressurizado por bombas e conduzido por tubos, atuando controladamente por intermédio de válvulas, acionando pistões, cilindros ou motores hidráulicos, conforme demonstrou Joseph Bramah (1748-1814), o primeiro a patentear uma prensa hidráulica, em 1795, invento conhecido como prensa Bramah (OEHLER, 1968).

Waganoff (1961) menciona que, cerca de 100 anos depois, em 1897, Alexander Dick patenteou na Inglaterra a primeira prensa para a extrusão de metais de elevado ponto de fusão, sendo considerado o pai da prensa de extrusão, a partir do que a

utilização de prensas começou a progredir a passos largos, de modo que, atualmente, poucas são as indústrias aonde as prensas não sejam aplicadas de alguma forma.

Pela sua versatilidade e utilidade as máquinas hidráulicas têm ampla aplicação em diversos processos e produtos, como na construção de outras máquinas e equipamentos, no forjamento de peças como virabrequins e eixos de comando de motores de combustão interna, abraçadeiras de aperto, peças ocas, variados tipos de canos, seja endireitando tubos, tiras ou hastes de metal, fabricando perfis, estampando componentes, produzindo fios de aço, cabos elétricos, injetando partes com alta pressão, endireitando perfis, produzindo briquetes de minério, de sucata, de serragem, de madeira, do pó de materiais cerâmicos, sintéticos, entre outros métodos, materiais e finalidades distintas.

As máquinas hidráulicas e em particular as prensas hidráulicas, têm utilidade em indústrias tão diversas como a de fibrocimento, a de refratários, a alimentícia, química e farmacêutica, couro e têxtil, dentre muitas outras. Na indústria automotiva onde máquinas hidráulicas são utilizadas para fazer peças de carroceria, partes de chassis, de suspensão, além de uma infinidade de etapas de processos requeridos em uma ampla gama de componentes, de muitos e distintos materiais aplicados à fabricação de veículos. Também são encontradas máquinas hidráulicas transformando pós granulados que são agregados sob elevada pressão, formando pastilhas de freio, partes de atrito de sistemas de embreagem, entre outros.

3.2 Arquitetura de Máquinas Hidráulicas

As máquinas hidráulicas são de amplo uso na indústria, tratando-se de equipamentos relativamente simples em sua arquitetura e em seu funcionamento. A Figura 6 apresenta uma ilustração de prensa hidráulica industrial.

Conforme se pode observar na Figura 6, uma prensa hidráulica é constituída de 11 elementos principais. Estes elementos são explicados na Tabela 4, que relaciona os itens ilustrados, com sua respectiva denominação e função. A estrutura mostrada representa um conjunto mecânico que, com características variáveis de acordo com a sua finalidade, existe em todas as máquinas hidráulicas industriais.

Figura 6 - Exemplo de prensa industrial moderna

Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2014)

Tabela 4 - Principais elementos e funções de uma prensa industrial moderna

ITEM Nº	CONTEÚDO	FUNÇÃO
1	Tirantes	São elementos de fixação fundamentais da estrutura da máquina hidráulica neste caso uma prensa, asseguram mecanicamente a sua potência.
2	Viga superior	Elemento de sustentação que faz parte do conjunto estático da prensa, onde são fixados os elementos de trabalho.
3	Guia auxiliar do cilindro	Com elevada precisão de construção, tem a finalidade de guiar o movimento realizado pela máquina.
4	Auxiliar do pistão do cilindro	Também atua no fornecimento de potência para prensagem e são úteis para compensar forças assimétricas.
5	Cilindro mestre	É o que executa a parcela principal da força de trabalho, movimentando o martelo para cima e para baixo.
6	Martelo	É a parte mecânica que recebe a força transmitida pelos pistões, é movimentada para cima e para baixo por estes.
7	Placa superior	Tem a finalidade de suportar e assegurar o correto posicionamento das ferramentas de moldagem específicas de cada trabalho.
8	Matriz superior	Parte superior do molde ou ferramenta que exerce o trabalho diretamente no material a ser processado.
9	Matriz inferior	Parte inferior do molde ou ferramenta, exerce o trabalho diretamente no material a ser processado.
10	Placa inferior	Tem a finalidade de suportar e assegurar o correto posicionamento das ferramentas de moldagem específicas de cada trabalho.
11	Viga inferior	Base estática da estrutura da máquina hidráulica, elemento onde são fixados dispositivos necessários ao trabalho.

Fonte: o autor

Este conjunto faz parte de uma estrutura de tamanho proporcional à capacidade de potência de trabalho que é realizado e pouco tem mudado ao longo do tempo. O sistema hidráulico fornece a potência requerida para o apropriado funcionamento da estrutura mecânica.

O fluido hidráulico é bombeado com uma determinada vazão e ao ser restringido por uma válvula resulta na elevação de sua pressão, é conduzido por encanamentos e gerenciado por válvulas, atuadores e cilindros de forma a executar os movimentos com a velocidade e a potência apropriados ao trabalho que é realizado.

Os sistemas hidráulicos convertem a energia elétrica em energia hidráulica, que por sua vez é transformada em energia mecânica por intermédio dos cilindros hidráulicos operando na máquina. Os deslocamentos são alcançados pelo fornecimento de fluido hidráulico, a velocidade do martelo é proporcional à vazão volumétrica e os movimentos para frente e para trás são controlados pelas válvulas que definem a direção do fluxo do fluido no sistema. O sistema hidráulico das máquinas hidráulicas e em particular das prensas é dividido em conjuntos funcionais, conforme está apresentado na Tabela 4.

O fluido hidráulico é armazenado no tanque de óleo e todos os tubos de aspiração para as bombas ou cilindros têm o seu fluido fornecido a partir deste reservatório.

O reservatório de fluido pode ser instalado suspenso na viga superior da máquina para, com o auxílio da força da gravidade, garantir que os cilindros sejam preenchidos quando a prensa se fecha em alta velocidade.

O sistema de acionamento hidráulico é constituído por bombas, motores e válvulas (Figura 7). As bombas utilizadas podem ser tanto bombas de imersão, como bombas em suspensão no tanque de óleo e elas também podem ser montadas em suportes na base da estrutura da máquina. Os motores de acionamento das bombas são acoplados a estas por meio de embreagens elásticas.

Figura 7 - Esquema de uma prensa hidráulica

Fonte: Adaptado de Schuler (1998)

As bombas recebem o fluido através de tubos de sucção e o fluido hidráulico é transmitido para as válvulas de comando por meio de tubos de alta pressão. O sistema de controle de válvulas orienta o fluxo de fluido hidráulico para as unidades apropriadas. Dependendo da função a ser realizada, os cilindros hidráulicos são estendidos ou retraídos, mudando-se de uma etapa ativa para outra passiva conforme sua função no ciclo de operação da máquina. O fluxo de retorno do fluido hidráulico ocorre todo o tempo em que haja excesso de vazão, depois de alcançada a pressão de trabalho, assim como, após a realização de cada ciclo de trabalho, parcelas de fluido utilizado neste são guiadas de volta para o tanque de óleo (SCHULER, 1998).

Os circuitos hidráulicos, dependendo de seu porte e aplicação, podem ter em sua constituição uma unidade de serviços que opera em uma derivação, ou seja, um circuito diferente do fluxo hidráulico principal. Nesta unidade, o fluido é recirculado

através de filtros, aquecedores ou refrigeradores, especificamente para sua purificação e aquecimento ou arrefecimento, de forma a assegurar que o sistema de acionamento hidráulico da máquina esteja sempre disponível e pronto para a produção de trabalho em todos os momentos.

Figura 8 - Fotografia de bloco de válvulas de uma máquina hidráulica

Fonte: Schuler (2015)

Entre o sistema de acionamento da bomba e os cilindros, em máquinas hidráulicas convencionais, as funções de aplicação de potência são controladas por válvulas. Válvulas direcionais, de pressão e retenção agem em conjunto com válvulas proporcionais e atuadores. Dependendo do sistema e posição no circuito primário ou secundário, válvulas de diferentes características e dimensões são utilizadas. A execução de todas as funções hidráulicas necessárias para a demanda de um grande número de ligações normalmente pode ser realizada agrupando-as em um bloco de válvulas conforme ilustra a Figura 8.

Máquinas hidráulicas são projetadas e construídas para atender uma ampla gama de requisitos e podem ser de grande porte e potência. Neste caso as maiores podem conter mais de um pistão de trabalho, o que resulta que a força de pressão nominal seja o resultado da soma da área de todas as superfícies ativas de todos os pistões utilizados, multiplicados pela pressão hidráulica fornecida pelo sistema.

As máquinas hidráulicas e em particular as prensas, tem a essência de sua operação segundo o princípio físico em que uma pressão hidrostática é distribuída uniformemente através de um sistema de tubos, e que uma pressão p , atuando sobre uma superfície de área A , produz uma força F conforme o princípio de Pascal descrito pela Equação 9 (SCHULER, 1998).

$$F = p \times A \quad (\text{Equação 9})$$

O material a ser trabalhado e o tipo de trabalho a ser realizado pela máquina hidráulica sobre este, constituem o produto final, ou seja, o objetivo útil que é a razão da existência da máquina realizando esta operação em determinado processo industrial. Este material, por exemplo, a ser conformado em uma prensa hidráulica onde isto é realizado pela força F que atua sobre a ferramenta da prensa, como resultado do produto da pressão do fluido hidráulico na parte superior que age na área do pistão principal da máquina.

A Figura 9 ilustra uma prensa hidráulica genérica no instante em que a ferramenta está em contato com a peça que será processada.

Figura 9 - Prensa em posição para realizar processo de formação

Fonte: Adaptado de Schuler (1998)

O funcionamento de uma prensa hidráulica tem três etapas principais:

Etapa 1 - Movimento acelerado em direção ao material a ser trabalhado.

Etapa 2 - Prensagem que faz o trabalho da formação do material.

Etapa 3 - Movimento de retorno para abrir o sistema e permitir a retirada da peça pronta e a colocação de uma nova peça a ser trabalhada.

É o direcionamento da vazão fornecida pelo sistema hidráulico que resulta na pressão atuante nas áreas desejadas. A pressão atua na cabeça do pistão, que por sua vez entrega a força que é conduzida pela haste que está fixada ao martelo da prensa, que solidariamente resulta na ação direta da ferramenta pelo tempo certo produzindo a potência requerida para executar o trabalho sobre o material. Após a realização da prensagem da peça, a pressão na cabeça do pistão cessa e esta pressão é direcionada neste momento para a parte inferior do pistão, o que leva o conjunto para retornar até a posição do ponto morto superior, ou de início do ciclo. A Figura 10 ilustra uma prensa hidráulica atuando em cada uma das três etapas principais.

Figura 10 - Funcionamento do cilindro principal de uma prensa hidráulica

Fonte: Schuler (1998)

A potência P exercida pela ferramenta sobre o material que é trabalhado é a força resultante da pressão p agindo sobre a área A da superfície do pistão, por uma unidade de tempo. Esta potência aplicada pela máquina hidráulica, neste exemplo, uma prensa, é a requerida pelo processo de formação realizado sobre o material sendo transformado. A sua medição pode ser utilizada diretamente para calcular a força que atua sobre a lâmina do material a ser prensado. Neste processo a força máxima do martelo da prensa pode ser estabelecida através da regulação da pressão hidráulica máxima no sistema, por meio de uma válvula de descarga.

Em uma prensa hidráulica convencional a válvula mantém a mesma pressão atuando sempre e em qualquer posição do pistão ao longo de seu trajeto. A potência P de uma prensa hidráulica depende do fluxo volumétrico $\dot{V}$ de fluido hidráulico, que também determina a velocidade do martelo.

Como todo sistema mecânico tem seu rendimento afetado pelas perdas naturais de seu projeto e características de funcionamento, a força efetiva exercida sobre o martelo é a remanescente após a subtração de todas as perdas mecânicas, hidráulicas, térmicas e elétricas. A totalidade destas perdas pode ser definida e equacionada como o rendimento η_g rendimento global do sistema da máquina hidráulica. A potência da máquina hidráulica pode ser calculada pela Equação 10:

$$P = \frac{\dot{V} \cdot p}{\eta_g} \quad (\text{Equação 10})$$

Máquinas hidráulicas convencionais, tais como as prensas hidráulicas demandam que toda a energia requerida para realizar a operação de formação do material a ser trabalhado, seja fornecida pela alimentação do fluido hidráulico do sistema de atuação. Por esta razão, prensas hidráulicas convencionais têm sua plena energia hidráulica sempre disponível.

Isto implica que o fluido hidráulico durante todo o tempo em que a máquina está ligada, permanece disponível com a sua plena pressão de trabalho. Esta pressão que é deliberadamente produzida e está disponível durante todo o tempo, é direcionada por válvulas que determinam a direção do fluxo do fluido hidráulico, fazendo a sua condução ou a inversão de seu sentido conforme seja o momento de

fechar a máquina, exercer a pressão de trabalho prensando a peça e em seguida, abrir a prensa, repetindo este processo em cada ciclo de trabalho desenvolvido, conforme pode observado na Figura 11.

Figura 11 - Deslocamento versus tempo de uma prensa hidráulica

Fonte: Adaptado de Schuler (1998)

Conforme está ilustrado na figura 11 o ciclo completo do pistão de uma prensa hidráulica pode ser dividido em três etapas:

A - Etapa 1: esta etapa é constituída de quatro sub etapas: a) parada no ponto morto superior, b) aceleração, c) descida rápida e d) frenagem.

B - Etapa 2: esta etapa é constituída de quatro sub etapas: e) estampagem 1, f) estampagem 2, g) chegada ao ponto morto inferior e h) retenção da pressão de estampagem.

C - Etapa 3: esta etapa é constituída de seis sub etapas: i) alívio da pressão, j) início do reverso, k) aceleração, l) curso de retorno, m) frenagem antes do retorno ao ponto morto superior e n) chegada ao ponto morto superior.

Observa-se que existem 11 subetapas distintas do respectivo deslocamento e, conseqüentemente, 11 tempos e eventos a serem destacados.

A Tabela 5 detalha os tempos e eventos ilustrados na Figura 11.

Tabela 5 - Detalhes de tempos e eventos de uma prensa hidráulica

Etapas	Evento	Posição do pistão	Tempo
1	Tempo de reação	ponto morto superior	0,05
	Aceleração	Inicia descida, acelerando	0,1
	Descida rápida	Desce em velocidade	t ₀
	Frenagem	Desce, reduzindo velocidade	0,2
2	Estampagem 1	Início do trabalho	t ₁
	Estampagem 2 - Gravação em relevo	Ponto morto inferior	t ₂
	Retenção de pressão	Ponto morto inferior	t ₃
3	Alívio de pressão - Início reverso	Ponto morto inferior	0,7
	Aceleração	Início da subida	0,1
	Curso de retorno	Subida em velocidade	t ₄
	Frenagem	Alcança ponto morto superior	0,2

Fonte: Adaptado pelo autor de Schuler (1998)

O curso total, o curso de estampagem, a força de formação e cada uma das parcelas de deslocamento são regulados pelos especialistas responsáveis pelo processo, de acordo com os moldes que serão utilizados para cada trabalho específico. Cada um dos valores destas configurações tem efeito sobre o tempo de ciclo da prensa e assim, por consequência, influem na produtividade, ou seja, na quantidade de produtos prensados por unidade de tempo. A unidade de potência é calculada com base na curva do deslocamento em função do tempo.

Quando uma máquina hidráulica convencional realiza um trabalho sobre uma peça, a energia mínima teórica é exatamente a necessária exclusivamente para a realização desse trabalho.

3.3 Estimativa do Gasto Energético de Máquinas Hidráulicas

Com o propósito do desenvolvimento de uma metodologia para aumentar a eficiência energética em máquinas hidráulicas industriais existentes é pertinente que sejam aplicados métodos e procedimentos para se avaliar a condição do equipamento selecionado para a aplicação da metodologia, abordando de forma sistemática, considerando-se o equipamento como um sistema em si, para que se possam analisar os fluxos energéticos operantes, definindo quem, como e quanto está sendo consumido de energia em seus diferentes componentes e etapas de funcionamento, o que permite que sejam consideradas as intervenções possíveis que idealmente após sua implantação resultarão em reduções mensuráveis no consumo de energia (BORTONI et al., 2012).

Encontrada a energia total consumida, a qual, em máquinas hidráulicas, pode ser mensurada em dois componentes distintos, a energia consumida calculada pelo balanço energético da máquina que reflete o conjunto de todos os componentes que a compõe e a energia consumida pelas características operacionais onde esta máquina está inserida, ou seja, o processo onde ela é utilizada.

Tanto a máquina como o processo têm a sua eficiência peculiar, e que resultam juntos na energia global consumida pelo sistema, que pode ser chamada de rendimento global das máquinas hidráulicas industriais.

3.3.1 Energia consumida calculada pelo balanço energético

A utilização eficiente da energia de uma máquina é a resultante da qualidade energética de cada um dos componentes utilizados em sua construção. Qualidade dos materiais empregados, qualidade dos ajustes, da precisão e da isenção de atritos, entre outros aspectos de cada um destes componentes que são concebidos e aprimorados a cada dia para realizar as suas funções com a menor demanda possível de recursos energéticos.

A racionalidade no uso e a melhora da eficiência na aplicação dos recursos energéticos devem ser buscadas por múltiplas razões, dentre elas o fato de que se trata de recursos limitados e, como tal, vêm apresentando tendência de aumento do

seu valor no tempo, que por sua vez impactam diretamente nos custos de produtos e processos. É de interesse estratégico, tanto para organizações como para usuários finais, e a sociedade em geral, que sejam desenvolvidos e se tornem cada vez mais acessíveis e aplicáveis métodos e equipamentos que reduzam o consumo desses recursos.

Energia não pode ser substituída por outros insumos. Energia só pode ser substituída por outra energia, e que, eventualmente, provém de outra fonte primária ou secundária, porém ela sempre se faz necessária na realização dos processos de transformação. A energia necessária em um dado equipamento pode ser reduzida em se aplicando conhecimento na forma de novas soluções tecnológicas de mais elevada eficiência para a realização do mesmo trabalho. Neste caso, ocorre a substituição de parcelas de energia por conhecimento aplicado, resultando em equipamentos funcionalmente mais eficientes em relação ao consumo energético de seus antecessores. Estas melhoras de eficiência energética por meio da tecnologia e da aplicação de conhecimento, em muitos ambientes se deparam com limitações tanto na formação dos agentes envolvidos, quanto em limitações orçamentárias e de recursos em geral. Constata-se o crescente descompasso entre os recursos investidos em geração e distribuição de energia frente à tendência de aumento da demanda por todos os setores da sociedade. Este descompasso poderá apresentar reflexos na forma de valores majorados pelo fornecimento de energia, também poderá aumentar o interesse e o potencial para a viabilização econômica de ações para a melhora da eficiência energética de processos industriais existentes. Isto pode ser obtido, por exemplo, pela adoção de maior grau de automação em equipamentos industriais hidráulicos de grande porte para a melhoria da sua eficiência energética com consequentes ganhos de competitividade e sustentabilidade. Para que se possam realizar estas modificações, adotando-se mais elevados graus de automação, em situações industriais existentes, é essencial que seja realizada uma auditoria energética do processo e do equipamento alvos do estudo. Uma abordagem possível para esta auditoria está ilustrada na Figura 12.

É necessário diagnosticar a situação real de consumo de energia para que seja possível avaliar as alternativas e buscar as de melhor efetividade tanto no aspecto energético quanto de viabilidade econômica.

Figura 12 - Etapas de um programa de uso racional de energia

Fonte: Bortoni et al. (2012)

Com isto podem ser realizados os projetos e em etapa seguinte podem ser realizadas as modificações planejadas. Importante observar que este é um processo que para sua aplicação são requeridas realimentações, pois, na medida em que avançam as tecnologias e os recursos de TA, soluções ótimas em um determinado momento, podem com o tempo se tornar relativamente menos eficientes.

Diagnósticos podem e devem ser realizados em projetos de equipamentos novos, buscando neste momento o estado da arte tanto no aspecto da eficiência energética quanto no da efetividade econômica, pois antes que este projeto se materialize os montantes de investimento para eventuais alterações são significativamente reduzidos, com um viés preventivo favorecendo que se evitem perdas e desperdícios.

Em instalações e equipamentos existentes, esta abordagem tem a potencialidade de, por meio de ações de modificação e reforma elevar o patamar de rendimento energético, o que sempre se dará corretivamente, em relação a um estado anterior. Estas situações implicam em reformar, eventualmente remover e substituir componentes com tecnologias ultrapassadas por outros mais atualizados, onde se configure um ganho no fluxo energético (BORTONI et al., 2012).

Bortoni et al. (2012) esclarece que este processo pode ser direcionado buscando-se respostas para as questões: Quanta energia é consumida? Quem está consumindo energia? Como esta energia está sendo consumida? Com que eficiência?

A busca das respostas corretas para as questões acima permite a identificação de fontes de perdas e que se traduzem em oportunidades para o uso de TA e tecnologias associadas para a racionalização do uso de energia e são de fato um primeiro e concreto passo na direção da melhoria da eficiência energética em processos existentes.

Mediante informações confiáveis, é possível estudar situações reais, identificar oportunidades, planejar e estruturar intervenções, que, por sua vez, devem trazer desempenhos condizentes com as metas de projeto, apropriadamente medidas e acompanhadas após a introdução destas intervenções.

Alcançadas e superadas estas metas, os bons resultados devem servir de modelo e referência para novas análises e intervenções que devem se seguir. Desta forma o que se almeja é o estabelecimento de um processo sistemático, uma metodologia que permita a aplicação de TA conjugada a novas tecnologias de forma a elevar substancialmente o patamar de eficiência energética de máquinas hidráulicas em instalações industriais existentes, particularmente pelo potencial que estas oferecem de contribuição.

Múltiplos recursos são requeridos para a aplicação desta metodologia, desde talentos humanos, recursos financeiros e materiais, motivo pelo qual são demandados alicerces de conhecimento nos âmbitos da engenharia, da administração e da economia. Para a estimativa do gasto energético em uma máquina hidráulica industrial genérica, temos na Figura 13 a representação de uma máquina hidráulica convenientemente ilustrada e acompanhada de seu esquema funcional.

Figura 13 - Prensa hidráulica e diagrama de funcionamento

Fonte: Adaptado de Schuler (1998)

A identificação da eficiência dos componentes no processo de conversão de potência em uma prensa hidráulica é fundamental para que se possa realizar o balanço energético deste tipo de equipamento industrial.

Cada um dos componentes do conjunto da máquina hidráulica tem suas características de projeto e funcionamento pertinentes à época em que foram desenvolvidos e às tecnologias, soluções de engenharia e de materiais empregados em sua fabricação.

O cálculo do balanço energético de uma máquina hidráulica é o produto das eficiências energéticas do conjunto de todas as partes que a compõe. A Tabela 6 apresenta os principais componentes de uma máquina hidráulica industrial e as respectivas faixas de gasto energético ou rendimento.

Tabela 6 - Rendimentos energéticos dos componentes de uma prensa hidráulica

Componente	Eficiência	
	Mínima	Máxima
Motor	80%	95%
Acoplamento	97%	99%
Bomba hidráulica	85%	95%
Sistema de válvulas direcionais	92%	96%
Sistema de válvulas de pressão	92%	96%
Cilindro	98%	99,95%

Fonte: Adaptado de Weg (2010)

Motores trifásicos das décadas de 1960 e 1970, apresentam rendimento energético de 85%, ao passo que motores modernos, produzidos a partir de 2010, apresentam eficiência energética na ordem de 95%.

Esses mesmos motores quando submetidos a processos de recondicionamento, o que é um procedimento de manutenção corriqueiro, em função de sua utilização e tempo de serviço, implica em reduções adicionais de eficiência, contribuindo para piorar o balanço energético (WEG, 2010).

Todos os demais componentes, sejam as válvulas ou a bomba hidráulica, de forma análoga, apresentam seus rendimentos energéticos e afetam o balanço energético final que resulta entre 55% e 82% da energia fornecida na alimentação da prensa hidráulica em análise (MOTION TECHNOLOGY, 2012).

O ilustrativo do balanço energético para uma prensa hidráulica industrial simples é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Balanço energético de uma prensa hidráulica

Fonte: Adaptado de Weg (2010)

3.3.2 Energia consumida na operação das máquinas hidráulicas

Observe-se que, embora o rendimento global de uma prensa hidráulica possa estar em uma faixa entre 55% e 82%, a perda de energia em uma prensa hidráulica é muito maior do que o balanço energético indica. Isso ocorre porque na realidade o real trabalho útil da prensa hidráulica só é realizado quando da formação da chapa metálica que está posicionada entre a ferramenta instalada no martelo e a sua metade inferior, que está fixada na base. É necessário, portanto, considerar além do balanço energético a energia consumida na operação.

Para a realização da tarefa de conformação mecânica da peça bruta em peça estampada, o sistema hidráulico do tipo convencional, que está ilustrado na Figura 15, tem o motor elétrico acionando a bomba hidráulica que vai por sua vez produzir uma vazão de fluido hidráulico no sistema. As válvulas de controle de pressão fazem com que esta pressão seja a apropriada e suficiente para que a potência requerida para a realização do trabalho esteja disponível. As válvulas de controle de deslocamento, quando o operador comanda, acionam o pistão principal para realizar o movimento de descida, seguido pelo trabalho de formação do material, este que é de fato o trabalho útil desejado, seguido pela subsequente subida do martelo com a ferramenta fixada neste até o seu ponto morto superior, deixando a peça já estampada pronta para ser retirada da ferramenta. O sistema hidráulico de uma prensa convencional funciona todo o tempo fornecendo a pressão e a vazão necessárias para a potência de trabalho que, como visto no balanço energético, é sempre inferior à potência fornecida pela rede de alimentação ao motor da máquina, mesmo durante os períodos de tempo em que o sistema de formação mecânica, o pistão da prensa, está imóvel, aguardando que o material já prensado seja removido e uma nova placa de material bruto seja posicionada para ser estampada.

Figura 15 - Fluxo de uma máquina hidráulica convencional

Fonte: Adaptado de SIEMENS (2015)

Durante toda esta etapa, o fluido hidráulico direcionado pelas válvulas é bombeado do tanque, é mantido pressurizado pelas válvulas e retorna ao tanque sem que seja utilizada a potência hidráulica disponível para nenhuma atividade útil. Durante os intervalos entre a realização das tarefas úteis, toda a energia elétrica transformada pelo motor em movimento de rotação, que por sua vez é convertido pela bomba em vazão de fluido, regulado pelas válvulas em pressão de trabalho, se transforma em calor, que se acumula no fluido hidráulico em todo o sistema e particularmente no tanque, reservatório deste. A representação da variação do fluxo, da pressão e da potência do fluido hidráulico na máquina ao longo do tempo, está ilustrada nas Figuras de 15 a 17.

O motor elétrico aciona a bomba hidráulica que fornece o fluxo de fluido ao sistema, como se pode observar na Figura 10, e parte deste fluido retorna ao reservatório de forma contínua depois de alcançada a pressurização de todo o sistema, que passa a operar em equilíbrio, com fluxo constante, mostrado na Figura 15 e também pressão constante como ilustra a Figura 16.

A pressão é regulada por uma válvula que permite ao fluido excedente retornar ao tanque, porém neste processo o fluido é aquecido pela resistência oferecida na válvula em oposição à vazão produzida na bomba hidráulica, que neste sistema resulta em pressão, mantida constante, conforme ilustrada na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico da pressão de uma máquina hidráulica convencional

Fonte: Adaptado de SIEMENS (2015)

A potência disponível no sistema da máquina é resultante do fluxo hidráulico mantido pressurizado.

Esta potência que é demandada para a realização do trabalho no momento em que as válvulas pressurizam o pistão, sendo que esta potência será diretamente relacionada à área física da superfície do pistão, conforme a equação 9, que recebe o fluido pressurizado e como ilustrado na Figura 17 esta potência está disponível de forma plena e durante todo o tempo em que o sistema está em funcionamento, mesmo nos períodos de intervalo e de espera.

Esta é uma característica de projeto presente nas máquinas hidráulicas convencionais.

Figura 17 - Disponibilidade de potência da máquina hidráulica convencional

Fonte: Adaptado de SIEMENS (2015)

A potência útil, parcela que serve efetivamente para a realização da conformação da matéria prima na peça desejada, está representada pela Figura 18 onde esta potência é a demandada pela máquina para a realização do trabalho.

Figura 18 - Necessidade de potência útil da máquina hidráulica

Fonte: Adaptado de SIEMENS (2015)

A energia perdida ou dissipada pelo tempo em espera e que é inerente ao processo onde a máquina é utilizada, está representada na área grafada em bege, parcela de potência situada entre a curva de potência laranja fornecida de forma constante pelo sistema hidráulico e a curva da energia útil, parcela intermitente e que é o produto da potência pelo tempo necessário para a formação do material a cada vez que a operação de formação é realizada, esta, marcada em cor azul, e que estão representadas conjuntamente na Figura19.

Figura 19 - Gráfico de potências fornecida e útil da máquina hidráulica

Fonte: Adaptado de SIEMENS (2015)

A energia global é dada por:

$$E_t = P \times (T_f - T_o) \quad (\text{Equação 11})$$

A energia útil é dada por:

$$E_u = P \times (T_f - T_i) \quad (\text{Equação 12})$$

A eficiência energética é dada por:

$$\text{Eficiência} = E_u / E_t \quad (\text{Equação 13})$$

A energia perdida ou dissipada, conforme a Figura 19 é consequência dos intervalos de tempo entre os ciclos de produção, sendo que esta energia perdida será tanto maior quanto menor for o uso efetivo da máquina nos seus períodos de disponibilidade, quando a máquina está em funcionamento sem estar efetivamente transformando o material bruto em peças processadas, o que de fato resulta definido pelo processo industrial em que a máquina está inserida.

3.3.3 Energia global consumida: rendimento global

A energia útil global ou rendimento global é a resultante do produto do balanço energético inerente à máquina hidráulica, seja ela uma prensa ou outra máquina, e o rendimento energético do processo produtivo onde esta é utilizada. Este valor será tanto maior quanto melhor seja eficiência energética de cada um de seus componentes como conjunto agregado em máquina hidráulica e do processo onde esta é aplicada.

A potência útil disponível é um aspecto inerente à máquina em si e que pode eventualmente ser melhorada substituindo seus componentes por mais modernos e mais eficientes e que podem resultar em uma potência útil mais elevada com a mesma potência elétrica fornecida. O processo onde a máquina é utilizada também é relevante e de forma análoga pode ser aprimorado, por exemplo, com medidas que reduzam os intervalos de tempo perdido entre as operações úteis. Assim, para uma mesma unidade de tempo em funcionamento com a mesma energia disponível,

aprimorando-se o processo pode ser possível aumentar a quantidade de peças processadas na máquina, ou por outro lado, para uma mesma quantidade de peças produzidas, pode-se reduzir a energia demandada, resultando em ambos os casos em melhora da eficiência global.

Para a melhoria do balanço energético se faz necessária uma alteração de projeto da máquina com o uso de componentes mais eficientes. Para a melhoria do processo o ganho de eficiência é obtido através do aprimoramento deste com oportunidades de aplicação de tecnologia da informação (TI) e TA, por exemplo, minimizando intervalos de tempo entre as operações de trabalho.

Uma abordagem conjunta, onde o rendimento do balanço energético é agregado ao produto do rendimento do processo, resulta na energia global consumida ou rendimento global do sistema. Ou seja:

$$RG = R_m \times R_{op} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde: R_m = Rendimento da máquina segundo o balanço energético
 R_{op} = Rendimento operacional da máquina
 RG = Rendimento Global

Observa-se que processos de fabricação em que lotes sejam pequenos ou com espaços de tempo de espera relativamente longos entre as operações são desperdiçadores de energia, transformando-a em calor nas máquinas hidráulicas convencionais.

Por outro lado, processos de fabricação em que lotes sejam grandes e com espaços de tempo de espera relativamente curtos entre operações, não são grandes desperdiçadores de energia.

Os desafios para aprimorar a eficiência energética das máquinas hidráulicas abrangem o que pode ser feito em termos de processos tecnológicos para reduzir as áreas de disponibilidade de potência ociosas e também o que se pode fazer aprimorando as soluções de hardware e software para melhorar o balanço energético da máquina ou equipamento.

Igualmente importante é a análise da viabilidade econômica de cada uma das alternativas e também que impactos para a sustentabilidade cada uma pode proporcionar.

4. METODOLOGIAS DE PROJETO E MAAMEES

Este capítulo apresenta um conjunto de metodologias associadas a projetos e, particularmente, a MAAMEES, que propõe que o desafio da eficiência energética seja enfrentado por organizações industriais de forma sistemática e contínua, alcançando patamares de economia que possam impactar nas matrizes de custo, de desempenho econômico e de sustentabilidade.

São apresentados, inicialmente, os impactos de TI e TA no contexto industrial e também a norma da *International Organization for Standardization* (ISO) 50001, que trata da gestão da eficiência energética, citando-se, em seguida, com base em Silva (2013) e em Zügue (2014), algumas das metodologias existentes para suporte na implantação de sistemas e na convergência de TI & TA, assim como no planejamento de projetos de automação industrial alinhados com o plano estratégico, concluindo-se então o capítulo com as etapas e a estrutura funcional da MAAMEES.

4.1 Contexto Industrial e o Impacto de TI e TA

Silva (2013) afirma que “a atividade de produção pode ser representada como um sistema que é responsável por converter recursos de entrada em saídas de produtos, subprodutos e defeitos”. Nessa abordagem as operações são categorizadas em função da similaridade dos trabalhos a serem realizados, podendo ser visto que sistemas, em sua estrutura fundamental, possuem três aspectos relevantes: entrada, processo e saída, que são os mesmos elementos mencionados por Slack, Chambers e Johnston (*apud* Silva, 2013).

As entradas dos sistemas industriais normalmente são constituídas pelos materiais, pelas máquinas, pelo trabalho, mão de obra, recursos financeiros, informações, entre outros. As saídas são normalmente constituídas por produtos, serviços, perdas, resíduos, dentre outros. Os processos se constituem em conversões que podem ser de características físicas, químicas, localização geográfica, propriedades orgânicas e de estado. Tanto TI como TA evoluíram ao longo do tempo em sua integração nas arquiteturas dos sistemas industriais em diferentes níveis, conforme Pereira (2009, *apud* SILVA, 2013) ilustra na Figura 20.

Figura 20 - Desenvolvimento da ciência, engenharia e TA na indústria

Fonte: adaptado de Pereira (2009, *apud* Silva, 2013)

Na Figura 20, Pereira (2009, *apud* SILVA, 2013, p.32) faz uma apresentação cronológica dos principais avanços nas tecnologias científicas, com os principais marcos da engenharia e da TA ao longo do último século, com a efetiva convergência da TI e TA ocorrendo a partir do início do século XXI. Para Pereira “o desenvolvimento da tecnologia para a integração da automação em todos os níveis, viabilizado com os sistemas *Manufacturing Execution Systems* (MES), pertence ao final do século XX e início do século XXI, ou seja, esta é uma tecnologia recente”, destacando “ser frequente que o grau de maturidade da tecnologia esteja avançado em relação à sua aplicação nas plantas industriais” (p.31).

Por exemplo, em termos industriais surge a Indústria 4.0, que é a "próxima fase da digitalização do setor de fabricação", e que esta sendo impulsionada por quatro grandes mudanças: o aumento surpreendente nos volumes de dados disponíveis, o crescimento da potência computacional e da conectividade, especialmente novas redes de grande área e de baixo custo; o surgimento de capacidades de análise e de inteligência de negócios capazes de lidar com *big data*; novas formas de interação do ser humano com as máquinas, como interfaces de toque e sistemas de realidade aumentada e melhorias na transferência de instruções digitais para o mundo físico, como a robótica avançada e a impressão 3-D (BAUR; WEE, 2015, p.1).

De acordo com os analistas da Baur e Wee (2015, p.1), no entanto, "as quatro tendências não são o motivo da 'Indústria 4.0', em vez disso esta é a quarta grande reviravolta na fabricação moderna, na sequência da revolução *lean* dos anos 1970, o fenômeno de terceirização da década de 1990 e a automação que decolou na década de 2000". Uma pesquisa com "*300 líderes industriais, feita em janeiro de 2015, mostrou que apenas 48% dos fabricantes se consideram prontos para a Indústria 4.0. Setenta e oito por cento dos principais fornecedores dizem que estão preparados*". No entanto, de fato, as empresas ainda não estão plenamente conscientes das tecnologias emergentes (p.2).

De acordo com o relatório de Baur e Wee (2015, p.1), a tendência das principais tecnologias para a Indústria 4.0 inclui as transformações que estão por vir: "big data", com análises avançadas, interfaces homem-máquina aprimoradas e transferência do ambiente digital para o estado físico. Essas transformações com certeza "serão de grande alcance, afetando todos os cantos da fábrica e as cadeias de suprimentos". A dinâmica de transformação, no entanto, provavelmente será mais lenta do que o que se vê no setor de consumo, onde equipamentos são alterados com frequência (p.3).

Neste contexto, é possível imaginar que as empresas terão de fazer a substituição de equipamentos antigos por outros mais avançados tecnologicamente. Os executivos entrevistados pela McKinsey estimaram que de 40% a 50% das máquinas de hoje precisarão de atualização ou substituição, o que abre uma janela de oportunidade para que a tendência de busca de novos níveis de eficiência energética possa ser otimizada.

Figura 21 - Cinco níveis da automação industrial

Fonte: Pereira e Souza (2008) *apud* Silva (2013)

Na Figura 21 se apresentam os cinco níveis hierárquicos da informação nas organizações, onde a convergência da TI e TA pode ser realizada a partir do nível quatro, com a apropriada aplicação de hardwares e softwares específicos para cada nível do ambiente organizacional. Melhorias de eficiência energética podem ser pesquisadas e obtidas desde o nível 1 da aquisição dos dados e controle manual, e o nível 2 com controles individuais (CLPs, inversores e relês), sendo possível ampliar a sua efetividade ao se incorporar a gestão energética nos níveis superiores, atuando no nível 3 - no controle e monitoramento remoto de dados - com a otimização dos processos; no nível 4 - no planejamento e controle do fluxo de trabalho no ambiente industrial e no nível 5 - no planejamento estratégico corporativo, conforme Webb (1992 *apud* Silva, 2013).

Züge (2014, p. 51) demonstra que, no contexto do ambiente industrial, TI e TA se integram fornecendo “dados desde o chão de fábrica até o nível gerencial das empresas”, possibilitando uma cadeia de facilitadores e inibidores que integram as principais áreas da organização, seja uma planta industrial, ou uma operação voltada à prestação de serviços, conforme está ilustrado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Facilitadores da integração de TI e TA no contexto industrial

Fonte: Züge, Pereira e Dias (2010)

As diferentes áreas da organização interagem entre si com as suas parcelas de contribuição favorecendo ou inibindo os processos de aprimoramento, seja no âmbito da integração entre TI e TA, quanto no da eficiência energética e outras iniciativas que almejam o aprimoramento de seu desempenho geral. A Figura 23 ilustra os diversos inibidores que podem interferir negativamente nestas iniciativas.

Figura 23 - Inibidores da integração de TI e TA no contexto industrial

Fonte: Züge, Pereira e Dias (2010)

Numa empresa industrial contemporânea, Züge (2014) mostra que os dispositivos e sistemas prevaletentes de acordo com os níveis de automação nas organizações

demandam recursos humanos com competências e qualificação específica, sendo que recursos humanos capacitados em TI assim como os profissionais habilitados em TA normalmente os primeiros não são capacitados em TA assim como os segundos raramente são habilitados em TI, tornando difícil a contratação de profissionais capacitados em TI e TA, o que pode ser compreendido como um inibidor para a convergência da TI e TA.

4.2 Tópicos Gerais sobre a Norma ISO 50001: Padronização da Gestão da Eficiência Energética

A ISO 50001 é uma norma internacional desenvolvida com o objetivo de sistematizar a gestão do desempenho energético das organizações. Seu nome oficial é “ISO 50001: 2011, Energy Management Systems - Requirements with guidance for use” e a sua aplicação segue os princípios do *Plan, Do, Check, Act* (PDCA), aplicando-se a plantas industriais, instalações comerciais ou qualquer empresa ou organização que almeje a melhoria da sua gestão energética.

Como outras normas conhecidas, tal como a norma ISO 9001, que tem em seu escopo a padronização de processos e qualidade, ou a norma ISO 14000, que tem em seu objetivo o atendimento das questões ambientais, as empresas e organizações podem se adequar a qualquer uma delas e alcançar a sua respectiva certificação, mediante um organismo auditor de terceira parte, atestando que estão em conformidade com estas normas.

Os principais aspectos que são contemplados na norma ISO 50001 são: a) ações preventivas e corretivas; b) auditorias e revisão das atividades para assegurar o atendimento à política e adequação ao sistema de gerenciamento energético (SGE); c) controle do sistema em si; d) estabelecer estrutura adequada e programa de ações para implantar a política e atender seus objetivos e métricas; e) facilitar o planejamento; f) foco em usos significativos de energia; g) identificar e tratar apropriadamente os requisitos legais; h) identificar prioridades; i) monitoramento constante; j) política energética apropriada; e k) selecionar objetivos apropriados. Estes aspectos e suas interdependências são apresentados nas Figuras 24 a 26 que ilustram a abrangência desta norma em três diferentes níveis de envolvimento possíveis de serem adotados pelas organizações na sua aplicação.

Figura 24 - Modelo de sistema de gerenciamento de energia para ISO 50001

Fonte: Adaptado de Zamzam (2014)

A Figura 24 apresenta os aspectos essenciais preconizados pela ISO 50001 e as suas interdependências, esta é a abordagem mais genérica da norma que almeja suportar todos os tipos de organização a aprimorarem sua gestão e desempenho energéticos. Nesta abordagem o processo se inicia com a definição pela alta cúpula da organização de uma política de energia, que será desdobrada em um planejamento energético, seguido pela implantação dos aprimoramentos e ações corretivas eventualmente identificadas.

Figura 25 - Sistema de gerenciamento de energia para ISO 50001

Fonte: Adaptado de Zamzam (2014)

Todo este processo é realizado de forma continuada de maneira a assegurar uma evolução da gestão energética nas organizações. A Figura 25 apresenta os aspectos preconizados pela ISO 50001 com um aprimoramento das etapas do PDCA em suas interdependências. Esta é uma abordagem mais específica da norma que indica uma prioridade hierarquizada de etapas no processo de suportar as organizações no aprimoramento da sua gestão e desempenho energéticos.

A obtenção do comprometimento dos envolvidos, o apoio da liderança da organização, o estabelecimento de uma equipe competente e habilitada para a condução do processo assim como a observância dos requisitos legais quando do estabelecimento da política de energia da organização, são aspectos fundamentais para que essa possa ser desdobrada efetivamente. Definidos estes aspectos iniciais, pode-se iniciar a etapa de planejamento, com a obtenção de informações, revisando-se os usos e a eficiência no uso de energia em busca das melhores oportunidades em termos estratégicos, que se traduzirão nas diretrizes para as demais áreas ou departamentos afetados na organização. Em seguida tem início a etapa de realização das atividades, com as revisões de projetos, identificação e

implementação de oportunidades para economia de energia, melhoria de serviços e a apropriada formação dos colaboradores com os treinamentos e qualificações.

Os resultados obtidos com as auditorias do sistema energético, as análises e o monitoramento do desempenho de equipamentos, processos, sistemas, tanto os aspectos que atingiram as metas, quanto àqueles que se apresentam ainda como oportunidades para melhoria, passam pela revisão gerencial onde recomendações e ações específicas são determinadas. Neste ponto todo o processo se inicia novamente, dado que a gestão da melhoria da eficiência energética é um desafio perene para todas as organizações empenhadas em seu aprimoramento.

A Figura 26 apresenta de forma sucinta os conceitos básicos com seus dados de entrada e de saída esperados em processos de planejamento da gestão energética. Esta abordagem simplificada pode ser um ponto de partida para as organizações de menor porte, onde a obtenção dos dados relacionados à história do uso da energia, seus custos assim como todas as variáveis existentes que possam ter influência significativa tanto no aumento como na redução do consumo, buscando identificar padrões de referência em organizações com atividades e porte similares, agregando dados suficientes para que as análises de consumo e de oportunidades possam ser realizadas com efetivo significado. Seguem-se as análises o estabelecimento de referências e a apresentação dos potenciais para melhoria da eficiência energética, o que devidamente é refletido na forma de objetivos, metas e planos de ação com o estabelecimento de responsabilidades e datas. Esta abordagem oferece uma plataforma simples que pode orientar esforços na direção de se adotar uma gestão da eficiência energética, o que é de fundamental importância para a competitividade econômica de produtos e serviços.

Figura 26 - Gerenciamento de energia para a norma ISO 50001

Fonte: Adaptado de Zamzam (2014)

4.3 Metodologias para Suporte na Implementação de Sistemas

As metodologias devem prescrever passos e fornecer os suportes e ferramentais que permitam de forma ordenada, o diagnóstico e a priorização das necessidades. Nesse sentido, é necessário descrevê-los para que se possa generalizar sua aplicação em diferentes situações, dentro de um arcabouço científico tal como será feito nesta tese com a MAAMEES.

Uma metodologia pode conter outras metodologias de igual importância no seu interior, tal como acontece com a MAAMEES, que se sustenta em metodologias desenvolvidas para soluções em TI e TA. Silva (2013) apresenta as principais metodologias relacionadas ao desenvolvimento de sistemas que são apresentadas em quatro grupos conforme suas principais finalidades, e que estão reunidas na Tabela 7.

Tabela 7 - Metodologias relevantes para o desenvolvimento de sistemas

Grupo	Metodologia	Descrição
Desenvolvimento de sistema	CLASSIC	Modelar o ciclo de desenvolvimento de software
	SCRUM	Otimizar o ciclo de desenvolvimento de software
	ZACHMANN	Integrar o desenvolvimento de um novo sistema com as necessidades de infraestrutura e mudanças dos processos lógicos
	ARIS	Captura de fluxos de trabalhos e a relação entre estes processos e o desempenho da organização
Convergência de TI & TA	CIMOSA	Criação de modelos funcionais, de interfaces, de dados e atributos físicos visando convergência da TI & TA
	PERA	Criação de modelos funcionais, de interfaces, de dados e atributos físicos visando convergência da TI & TA
	GIM	Criação de modelos funcionais, de interfaces, de dados e atributos físicos visando convergência da TI & TA
Alinhamento funcional e de ativos com objetivos de negócio	FCS	Identificar necessidades de sistemas em função dos fatores críticos de sucesso da organização
	STRATEGIC GRID	Diagnosticar o papel da área de tecnologia de informação nas empresas
	COBIT	Estabelecer processos para a gestão dos ativos de tecnologia e critérios para avaliação do desempenho desta gestão
	PDAI	Planejar os investimentos em automação industrial
Revisão de processos e produtos	DMAIC	Encadeamento de ações com foco em transformações de produtos e/ou processos partindo de avaliação de fragilidade do cenário corrente (As Is)

Fonte: Silva (2013)

Reunidas no primeiro grupo, que tem o foco no desenvolvimento de sistemas, estão as metodologias: Clássica, Scrum, “Zachman Framework” e “Aris”.

A metodologia Clássica se inicia na definição dos requisitos funcionais e não funcionais, seguidos por uma etapa de análise, que resulta em uma especificação estruturada estabelecendo como o sistema atenderá aos requisitos. Segue-se então a etapa de projeto, onde o sistema é subdividido em componentes que, por sua vez, serão transformados em programas na etapa subsequente onde serão codificados. Todas estas atividades têm a sua consistência verificada na etapa de testes que precede seu uso final o que acontece com a entrada do sistema em operação (SILVA, 2013, p.48).

A metodologia Scrum tem o seu foco na interação com o usuário final, durante o processo de desenvolvimento, repetindo os ciclos da metodologia clássica em subetapas, visando reduzir o risco de que o sistema resulte diferente das expectativas dos usuários. Ela se realiza com desenvolvimentos incrementais que

almejam reduzir o tempo necessário para o retorno dos investimentos aplicados no sistema, beneficiando seus usuários (SILVA, 2013, p.50).

A metodologia Zachman tem por objetivo a colaboração para a convergência das diversas perspectivas dos interessados no sistema, abrangendo as perspectivas de quem vai utilizar os resultados deste, de quem vai realizar o desenvolvimento, de quem vai operar o sistema durante sua vida útil, valendo-se de níveis adicionais de automação dentro da própria etapa do desenvolvimento para assegurar que mudanças em uma determinada visão ou contexto sejam reconhecidas pelas demais (SILVA, 2013, p.53).

A Metodologia Architecture of Integrated Information Systems (ARIS) subdivide o processo de negócios em quatro dimensões para realizar sua análise: dados, funcional, organização e controle. Seu foco principal é o atendimento das necessidades de quem vai usar o sistema e também de quem vai projetar a solução (SILVA, 2013, p.55).

Reunidas no segundo grupo que tem o foco na convergência de TI e TA, encontram-se três metodologias: *Computer Integrated Manufacturing - Open Systems Architecture* (CIMOSA), *Purdue Enterprise Reference Architecture* (PERA) e *GRAI Integrated Methodology* (GIM).

A metodologia CIMOSA compreende uma visão evolutiva com foco na implantação da solução na perspectiva de quem desenvolve o sistema e é dividida em três etapas: a criação de um modelo genérico que seja aplicável a qualquer tipo de indústria, o desenvolvimento parcial de um modelo ainda genérico, mas já focando dados de um determinado segmento, e o refinamento, tornando-o específico para uma determinada operação ou planta produtiva de uma organização. Em cada uma destas etapas alinham-se as dimensões de função do processo a ser desempenhado, informações com as fontes dos dados que são utilizados pelas funções, recursos da infraestrutura que serão aplicados ao processo e a organização ou o agente da estrutura organizacional responsável pela função desenvolvida. O seu destaque reside em oferecer uma arquitetura de referência padronizada para a convergência de TI e TA (SILVA, 2013, p.57).

A metodologia PERA prescreve um ciclo de vida para as aplicações de sistemas que expande a visão da metodologia clássica acrescentando fases adicionais. Ela tem um ciclo de vida com três macro etapas que são: a análise funcional, a implantação

e a operação. Cada uma destas macro etapas é considerada pelas perspectivas de ativos de produção, organização e sistemas de controle e de informações. Importante contribuição da metodologia PERA é a proposta de se utilizar um plano diretor no início do ciclo de vida do modelo e também a consideração dos aspectos de obsolescência ao final do ciclo de vida. Ela se destaca ao lado da metodologia CIMOSA pelo desenvolvimento de padrões e na criação de pacotes de sistemas (SILVA, 2013, p.59).

A metodologia GIM se inicia com a definição dos requisitos e o levantamento dos sistemas existentes, baseados nos quais são feitas as delimitações do escopo do projeto. A fase inicial desmembra-se em quatro dimensões: física, funcional, decisão e informação. A fase de análise tem seu fechamento com um filtro de detecção de inconsistências entre as diferentes visões, após o que os requisitos dos usuários são desenvolvidos e implantados, incorporando o novo sistema como parte da arquitetura da organização. A metodologia GIM representa um incremento em relação às metodologias anteriores por estabelecer uma perspectiva e uma visão hierárquica dos níveis de decisão da organização e das interações entre eles, inclusive com fluxos bidirecionais (SILVA, 2013, p.62).

No terceiro grupo estão as metodologias indicadas para o alinhamento funcional e de ativos com os objetivos do negócio: FCS, STRATEGIC GRID, COBIT, PDAI.

A metodologia Fatores Críticos de Sucesso (FCS) tem como objetivo definir a arquitetura de sistemas adequada à organização onde os próprios usuários se tornam responsáveis pelas definições das respectivas necessidades no âmbito dos sistemas. Os fatores críticos de sucesso do negócio devem ser identificados e derivados em indicadores que permitam a medição dos avanços da organização em direção ao atingimento de suas metas. Podendo ser plataformas para soluções de BI – *Business Intelligence* ou mesmo servir de base para soluções de *Balanced Score Card* (BSC), ambas, ferramentas uteis para o processo de gestão (SILVA, 2013, p.65).

A metodologia Grid Estratégico é representada por um modelo de quatro quadrantes onde se busca a contribuição para uma melhor compreensão do papel da TI nas organizações. Compreender o papel da TI nas organizações permite que se defina o caminho para o alinhamento, se ela será definida em função da estratégia ou se ela possui relevância a ponto de mudar a estratégia da organização, ou até se isto ocorre nos dois sentidos. Busca-se neste modelo entender qual função terá as

qualidades de líder ou de liderada no desenvolvimento dos sistemas, com reflexos importantes nas definições de infraestrutura de tecnologia e o seu papel na organização (SILVA, 2013, p.67).

A metodologia *Control Objectives for Information and Related Technology* (COBIT) tem como objetivo central a contribuição para a entrega de produtos e serviços de TI para a organização. Normalmente é representada por um cubo onde uma face representa as funções da área de TI, realizadas por meio de processos, outra face representa as expectativas sobre os serviços que são prestados pela área de TI para a organização e a terceira face representa os recursos que são disponibilizados para que a área de TI possa cumprir suas funções na organização. Tendo sido criada com base na sistematização de modelos e práticas anteriores a COBIT vai além dos objetivos de desenvolvimento de sistemas, focando na função agregadora de TI nas organizações (SILVA, 2013, p.70).

A metodologia Plano Diretor de Automação e Informação (PDAI) é resultante da evolução dos planos diretores de automação industrial que focam a definição das ações que constroem a arquitetura de sistemas de automação industrial das organizações. O PDAI possui o mesmo objetivo ampliado para a inclusão da camada de convergência de TI e TA. Esta metodologia é frequentemente aplicada por fornecedores de serviços e consultorias de automação. Sua aplicação compreende três etapas principais, a primeira fazendo um amplo levantamento dos processos da organização e dos seus ativos de tecnologia de informação e de automação, a segunda realizando uma avaliação do grau de automação dos processos, ao passo que a terceira etapa apresenta um plano de trabalho propondo os projetos e a priorização dos objetivos da organização a serem alcançados dentro da arquitetura desejada de TI e TA pela organização (SILVA, 2013, p.72).

No quarto grupo das metodologias para revisão de processos e produtos, encontra-se a metodologia DMAIC. A metodologia *Define, Measure, Analyse, Improve and Control* (DMAIC) que é uma das mais utilizadas nos ambientes industriais nacional e internacional para o aprimoramento de processos. Esta metodologia é composta por cinco etapas, 1) Definição, onde os problemas são estudados e entendidos pelo ponto de vista do cliente; 2) Medição, onde critérios objetivos são definidos para a mensuração do problema; 3) Análise, onde são avaliadas e discutidas alternativas e soluções para a resolução dos problemas e se planeja sua respectiva implantação;

4) Aprimoramento, onde se realizam as modificações nos processos; 5) Controle, onde se verificam se os resultados que foram previstos na etapa de definição atingiram os objetivos, e se as melhorias realizadas tiveram efeito nos resultados. Ganhos de produtividade e de qualidade são obtidos com a aplicação apropriada da metodologia DMAIC, onde sistemas de TI e TA são tratados como agentes de suporte e viabilização de melhorias de processos e controles em uma abordagem que pode ser feita na forma de melhoria contínua. Em relação às metodologias apresentadas anteriormente o DMAIC oferece a vantagem de requerer um menor esforço para a absorção e aprendizado da metodologia, pois já é reconhecido e mesmo já faz parte de muitas culturas industriais (SILVA, 2013, p.74).

Silva (2013) propõe a Metodologia Para Convergência de Tecnologia de Automação e Informação (MPCTAI), que visa a redução do risco para o processo de integração da Tecnologia da Informação e Tecnologia da Automação, através do alinhamento e do planejamento e da convergência dos fatores críticos do sucesso da empresa, enquanto Züge (2014) apresenta a MAPEAS – Metodologia para o Planejamento Estratégico do Plano Diretor da Automação Industrial, a qual propõe que, para além dos ganhos de eficiência e econômicos, também sejam atingidos elevados níveis de sustentabilidade nas atividades empresariais.

A metodologia MPCTAI, Metodologia para Convergência de Tecnologia de Automação e Informação, é adotada no contexto da intensificação do processo de globalização da economia e do aumento da interdependência dos mercados, o que têm determinado uma crescente necessidade de melhoria da competitividade de todos os setores industriais. Ela propõe um método estruturado para facilitar a convergência de TI e TA dos setores produtivos e administrativos das corporações.

Sua etapa inicial é a identificação das necessidades do negócio que se desejem atender com a convergência de TI e TA, seguida pela apresentação dos motivadores para a aplicação da MPCTAI, seu fluxo de trabalho e eleição da equipe responsável pela condução dos mesmos. Na sequência são delimitados os escopos para a sua realização nos processos industriais, visão dos gestores e seus indicadores e metas.

Evoluindo com a MPCTAI, são medidos os riscos de uma meta não ser atingida por fragilidades inerentes à arquitetura existente de TI e TA; seguida por uma análise das possibilidades destes riscos serem minimizados por intermédio de novas funcionalidades de TI e TA que passam a serem integradas em um novo processo.

Implantada a nova situação, seguem-se aprimoramentos, com a proposta de novas camadas de integração de TI e TA que fornecerão vantagens adicionais ao processo sendo aprimorado.

Controles são definidos em consenso entre os gestores da metodologia, cronogramas são revisados e atualizados. Finalmente se encerra o projeto com a confirmação de terem sido atingidas as metas e objetivos estabelecidos tanto de melhora nas informações como na produtividade e retorno financeiros.

A metodologia MPCTAI é uma ferramenta que pode proporcionar altos níveis de efetividade na convergência de TI e TA, sendo de importância impar para a MAAMEES, com seus resultados cada vez mais necessários no ambiente competitivo do mercado cada vez mais globalizado, o seu fluxograma de aplicação está ilustrado na Figura 27 (SILVA, 2013).

Figura 27 - Fluxograma para aplicação da MPCTAI

Fonte: Silva (2013)

A metodologia MAPEAS, Metodologia para Alinhamento do Planejamento Estratégico e o Plano diretor de Automação para a Sustentabilidade, é adotada no contexto das organizações que estão engajadas em desenvolver e aplicar processos aprimorados para a tomada de decisões com foco na sustentabilidade. Nesse sentido é totalmente afinada com a MAAMEES, onde sua aplicação permite que as decisões não apenas contemplem os benefícios da sustentabilidade ambiental, mas também propiciem ganhos de eficiência e econômicos por intermédio do alinhamento do plano diretor da automação industrial com objetivos e metas estratégicas com propósitos ambientalmente sustentáveis.

A MAPEAS utiliza o modelo de relatório da *Global Reporting Initiative* (GRI) o que é um aspecto favorável, pois oitenta por cento das maiores organizações já o adotam.

Esta metodologia foi desenvolvida mediante a análise de três aspectos das organizações com dois temas centrais, compostos pela análise do planejamento estratégico com relação à sustentabilidade, a análise das etapas do seu plano diretor de automação industrial com relação as diretrizes definidas pelo planejamento estratégico e uma análise dos indicadores de sustentabilidade que sofrem influência da automação industrial. Esta metodologia é detalhada em suas diversas etapas como está ilustrado na Figura 28 (ZÜGE, 2014).

Figura 28 - Etapas para Aplicação da MAPEAS

Fonte: Züge (2014)

Além das metodologias anteriormente apresentadas, observa-se, sobretudo nos campos das engenharias e na aplicação para ambientes industriais, a existência de uma ampla gama de metodologias, sempre com o propósito de aumentar a efetividade dos sistemas e obter ganhos de produtividade.

Uma dessas metodologias é denominada “Metodologia para Controle Dinâmico Híbrido em Prensas Mecânicas” e tem por propósito apresentar uma solução para automação de prensas mecânicas excêntricas, onde um dos componentes fundamentais do projeto - o sistema de controle - é baseado na plataforma LabVIEW, uma solução produzida pela empresa americana National Instruments, possibilitando aumentos significativos da produção, com redução dos tempos improdutivos (MORTAIO, 2013).

Outra metodologia ainda aplica o modelo Seis Sigma para a redução das perdas em processos de manufatura, formando-se equipes para focar na redução de perdas inerentes a um processo específico, onde com a introdução de uma nova etapa, viabilizou-se a recuperação do total das perdas anteriores, obtendo-se nível sigma superior a seis ao final da sua aplicação (SCATOLIN, 2005).

Por fim, vale citar a “Metodologia para Levantamento de Riscos Ergonômicos em Prensas Mecânicas Excêntricas”, proposta por Eckhardt et al. (2009), que propõe relacionar os esforços de melhoria nas condições humanas no trabalho com aspectos da responsabilidade social das empresas, realizando um levantamento de riscos ergonômicos em estações de trabalho industrial.

4.4 Estrutura, Conceituação e Aplicação da MAAMEES

A MAAMEES é uma metodologia que tem como principal objetivo auxiliar e nortear decisões de engenharia que propiciem a melhoria da eficiência energética de máquinas hidráulicas industriais de grande porte. Conforme pode ser observado na Figura 29, a MAAMEES é constituída de três macro etapas:

A- Macro Etapa I “Análise *ex-ante*;

B- Macro Etapa II Implementação; e

C- Macro Etapa III “Análise *ex-post*.”

As Figuras 29 e 30 ilustram respectivamente os fluxogramas das macro etapas I, II e III.

Figura 29 - Parte A do fluxograma da MAAMEES - Macro etapa I análise *ex-ante*

Fonte: o autor

Figura 30 - Parte B do fluxograma da MAAMEES - Macro etapa II implementação e macro etapa III análise *ex-post*

Fonte: o autor

4.4.1 Macro Etapa I: análise *ex-ante*

Conforme pode ser observado na Figura 29, a MAAMEES é iniciada com o processo de identificação das necessidades e oportunidades para melhoria da eficiência energética da empresa no seu processo produtivo e nas máquinas ou na máquina a ser trabalhada.

Observe-se que este estudo tem como objetivo definir qual será(ão) a(s) máquina(s) de grande porte que será(ão) trabalhada(s).

Uma vez definida a(s) máquina(s), deve-se estudar e analisar a(s) mesma(s) em operação para se obter o conhecimento necessário sobre o seu comportamento mecânico e operacional.

Em seguida, deve-se analisar o funcionamento e o processo de trabalho da(s) máquina(s), bem como realizar estudos dos indicadores econômicos associados a cada máquina no contexto de sua participação no processo de produção.

A análise de viabilidade econômico-financeira e tecnológica da(s) máquina(s) deve fazer uso, sobretudo, dos modelos financeiros mais populares na prática para avaliar o desempenho econômico e financeiro de projetos, sendo importante destacar as bases teóricas, em especial relativamente aos métodos como o Período de *Payback* (PB), o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Return On Investment* ou Retorno Sobre Investimento (ROI), modelos esses que são apresentados no Anexo A desta tese.

Uma vez realizadas as etapas citadas, tem-se o conhecimento necessário se é possível tecnicamente ou economicamente efetuar a modelagem conceitual da máquina. Deve-se analisar, então, se é ou não viável, técnica e economicamente, a modelagem da máquina em estudo. Se não for viável, deve ser feita a medição do consumo energético diretamente na máquina em seu processo de operação, ao passo que, em sendo possível fazer a modelagem da máquina e de cada um de seus componentes, será também possível obter estimativas do consumo energético a priori.

No que tange a modelagem, deve-se observar que embora a ciência da mecânica dos fluidos e da engenharia mecânica estejam consolidadas, nem sempre é possível a sua aplicação prática quando a complexidade da máquina ou o número de seus elementos constituintes é muito elevado. Isto se deve ao fato de que nem sempre existem tempo ou mesmo recursos financeiros para se fazer modelagem.

Uma vez que a estimativa do consumo energético tenha sido realizada, seja por meio de modelagem ou mesmo por meio empírico, deve-se fazer a medição real do consumo e compará-lo com o estimado. Os fundamentos da MAAMEES adotados neste trabalho de pesquisa indicam que a diferença entre a estimativa e o consumo efetivamente medido deva ser de menos de 10%. Caso a diferença entre o estimado e o real seja maior, deve-se avaliar se é o caso de abortar a análise ou de retomar o processo nas etapas anteriores. No caso da diferença ser inferior a dez por cento, deve-se iniciar um processo de análise que deve considerar informações tecnológicas e também econômico-financeiras, incluindo parâmetros de valor agregado, volume de produção, disponibilidade de recursos para investimentos, avaliando-se indicadores de rentabilidade e de retorno, dentre outros, que sejam relevantes para os tomadores de decisão optar entre a Solução Tecnológica Avançada (STA), mais dispendiosa, e a Solução de Efetividade Máxima (SEM).

Observe-se que no desenvolvimento e aplicação da macro etapa 1, *ex-ante*, surgem duas possibilidades de aprimoramento da máquina hidráulica industrial de grande porte, as quais são denominadas nesta tese de STA e SEM.

Conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 29, é a análise econômica das condições existentes que determina se deve ser adotada a solução STA ou a solução SEM. A STA implica em aproveitamento de parte estrutural dos equipamentos, realizando a sua modernização mediante investimentos na substituição do sistema hidráulico convencional pré-existente por um moderno

sistema de servo motor acoplado a bomba hidráulica de alta precisão e eficiência, que são integrados a sistemas dedicados de gerenciamento de operação e processos. A Figura 31 ilustra a arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica genérica com a solução STA.

Figura 31 - Arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica genérica após a solução STA

Fonte: Adaptado de Voith (2017)

Esta solução foi implementada em caráter experimental pela empresa Voith na cidade de Rutesheim, na Alemanha. No experimento a economia de energia obtida foi da ordem de 75% conforme Voith (2017).

Na Figura 31 está ilustrada a arquitetura de hardware de uma máquina com a solução STA que implica na utilização de motor de passo acoplado a bomba hidráulica de alta eficiência e comandados por sistema de automação específico que mantém o motor de passo inoperante até o momento em que haja o comando de acionamento para que seja iniciada uma operação de produção instantânea no qual o motor de passo é acionado e este atua na bomba hidráulica fornecendo a pressão apropriada a cada etapa do processo de transformação do metal conforme já explanado e ilustrado na Figura 11.

A elevada eficiência energética é obtida pelo uso da energia unicamente no momento e na razão direta da necessidade da operação em cada uma de suas fases, mantendo o sistema de potência praticamente desenergizado durante todo o tempo em que está fora do processo de produção. Disto resulta que são gerados níveis mais baixos de ruído e até mesmo o fluido hidráulico do sistema opera em temperatura significativamente inferior ao dos sistemas convencionais.

Este “modus operandi” reflete uma solução técnica apenas possível com os avanços na tecnologia dos motores de passo de elevada potência acoplados a bombas hidráulicas de alta precisão e capacidade, gerenciados por sistemas de automação e sensores que permitem o uso da energia no momento e na quantidade requerida pelo trabalho a ser realizado.

A Figura 32 ilustra em detalhes a arquitetura da máquina hidráulica onde foi implementada a solução STA na empresa Voith na cidade de Rutesheim na Alemanha. O sistema inclui uma CPU modelo SIMATIC S7-317TF apropriada para a gestão das demandas do sistema hidráulico e para a gestão das funções requeridas pelas normas de segurança específicas deste tipo de operações industriais.

Figura 32 - Detalhamento da arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica com a solução STA

Fonte: Adaptado de Voith (2017)

Na Figura 32 é possível observar que os sistemas de válvulas hidráulicas convencionais são quase totalmente eliminados. O software de gerenciamento inclui funções de segurança como a exigência das duas mãos do operador atuando simultaneamente para ativar o processo produtivo.

A aplicação da STA resulta em uso de menos volume físico por seus componentes na máquina do que a solução hidráulica convencional que está sendo substituída. Esta característica facilita os processos de modernização de equipamentos. Os sensores utilizados no processo de modernização pela STA favorecem também diagnósticos apropriados para a aplicação de manutenção preventiva e preditiva.

A solução SEM, por sua vez, quando adotada, poderá ter duas arquiteturas básicas: quando a máquina já tiver um sistema de controle de ligar e desligar gerenciado por um controlador lógico programável. Praticamente nenhum equipamento sobressalente será necessário; já quando a máquina for antiga, deverá ser acoplado um controlador programável integrado ao sistema de acionamento e sensores de posição.

A Figura 33 apresenta uma fotografia da prensa hidráulica industrial de grande porte onde foi aplicada a solução STA na cidade de Rutesheim, na Alemanha.

Figura 33 - Fotografia da Solução STA no experimento de Rutesheim, Alemanha

Fonte: Voith (2017)

A solução SEM tem como princípio o desligamento automático da máquina hidráulica quando a mesma não está em produção. A Figura 34 ilustra a arquitetura de hardware de uma máquina hidráulica genérica com a solução SEM.

A SEM busca aproveitar soluções já existentes, como a de segurança funcional no local da operação, do tipo NR-12 (Brasil, 2015), e é relativamente mais barata por que requer apenas a análise do processo produtivo e da máquina em si, com a inserção de novas sequências lógicas no software da TA já existente.

Esta solução aproveita o equipamento, agregando rotinas adicionais de automação via ajuste e inserção de linhas de comando nos softwares que são responsáveis por adequar as demandas produtivas às potencialidades de redução de consumo identificadas no estudo do equipamento.

Figura 34 - Arquitetura do hardware de uma máquina hidráulica genérica com a solução SEM

Fonte: Adaptado de Schuler (1998)

Ela também aprimora o processo produtivo de forma a assegurar o funcionamento do sistema hidráulico no período mínimo viável para a execução dos lotes programados. Esta lógica permite que a máquina equipada com a SEM permaneça desligada na maior parte dos seus períodos de intervalo ou de ociosidade entre as atividades de processamento dos lotes produzidos, com um mínimo de interferência dos operadores.

Optando-se pela STA ou pela SEM, conforme a realidade própria de cada organização deve-se convidar empresas especializadas no fornecimento de tecnologias específicas para cada tipo de solução, para oportunamente participar de licitações, de modo que em cada caso sejam feitas estimativas técnicas de redução do consumo energético e ofertas técnico-comerciais para o projeto.

Os tomadores de decisão, de posse, então, de informações técnicas e econômicas derivadas do potencial de aplicação da STA ou da SEM, especialmente relativas aos investimentos adicionais frente aos benefícios que serão proporcionados, poderão então tomar a decisão sobre se vão ou não implementar a solução melhor aplicada à sua realidade.

Se os resultados, conforme o fluxograma da Figura 30, não atenderem às expectativas que levaram à adoção da MAAMEES, os tomadores de decisão podem optar por abortar ou não o processo. Se for abortado, deve-se informar aos colaboradores, encerrando-se as atividades associadas ao projeto. Caso não seja abortado reinicia-se a análise para aplicação da MAAMEES, repetindo-se as etapas descritas anteriormente. Se os resultados atenderem às expectativas, os decisores podem, mesmo assim, optarem pela não implementação, devendo neste caso informar aos colaboradores, encerrando-se as atividades associadas ao projeto. Entretanto, se decidirem pela implementação, passa-se para a Macro Etapa II da MAAMEES, que é a implementação.

4.4.2 Macro Etapa II: Implementação

Na macro etapa II, haverá sido adotada uma de duas soluções possíveis: STA ou SEM, conforme explicado no item 4.4.1. desta tese de doutorado. A opção escolhida exigirá que ações sejam tomadas, como a contratação de produtos e serviços, conforme cada caso. Por fim, devem ser feitas novas medições reais de consumo energético.

4.4.3 Macro Etapa III: análise *ex-post*

Dado que foi realizada a aplicação da MAAMEES, seja através da STA ou da SEM, deve-se realizar então a coleta de medições e indicadores que permitirão a análise dos ganhos efetivamente obtidos em termos de eficiência energética, possibilitando compará-los com a situação *ex-ante*.

Um primeiro passo é a determinação dos ganhos de eficiência alcançados, onde se verifica se houve confirmação dos ganhos teóricos em termos de eficiência energética mediante comparação dos resultados reais antes e depois da aplicação da metodologia. Deve-se também observar se os resultados alcançados confirmam a análise de viabilidade econômica e tecnológica realizada na macro etapa 1.

Após a confirmação dos ganhos de eficiência energética, devem ser identificados também quais foram os ganhos de economia de insumos, de emissões de CO₂, dentre outros fatores de natureza econômica, ambiental e de sustentabilidade.

5. APLICAÇÃO DA MAAMEES

Este capítulo apresenta a aplicação da MAAMEES, a qual foi efetuada em duas situações distintas: em uma máquina na planta de São Bernardo do Campo da Mercedes Benz do Brasil (MBB); e, em caráter de pesquisa aplicada, em uma planta da Voith, em Rutesheim na Alemanha.

5.1 Aplicação da MAAMEES na Fábrica da MBB em São Bernardo do Campo

A fábrica da MBB em São Bernardo do Campo possui diversas máquinas hidráulicas de diferentes gerações. Assim também existe a necessidade da gestão da empresa de tomar uma série de decisões de engenharia que visem a melhoria de diversos indicadores técnicos e econômicos como o da melhoria da eficiência energética.

A aplicação da MAAMEES seguiu os passos definidos no fluxograma apresentado nas Figuras 29 e 30, contendo as Macro Etapas I, II e III, respectivamente Análise *ex-ante*, Implementação e Análise *ex-post*, sendo que as duas últimas foram realizadas por simulação.

5.1.1 Macro Etapa I: análise *ex-ante*

Seguindo o fluxograma das Figuras 29 e 30, foi realizado um diagnóstico preliminar na unidade operacional visando a identificar a máquina objeto dos estudos e eventuais oportunidades de melhoria de eficiência energética.

5.1.2 Identificação da máquina e oportunidade de melhoria de eficiência energética

Encontram-se em operação, na planta industrial escolhida, dezenas de prensas com capacidade de até 1.300 toneladas, várias delas hidráulicas, as quais apresentam padrão de consumo energético convencional, sem aplicação de medidas ou tecnologias visando especificamente a ganhos de eficiência energética.

Dentre essas máquinas, após reuniões e visitas às áreas produtivas, foi escolhida a máquina mostrada na Figura 35, equipamento esse no qual se aplicaram os procedimentos práticos da MAAMEES.

Figura 35 - Fotografia da prensa Ciola 60t (fabricada em 1976)

Fonte: o autor

A máquina escolhida, conforme seus dados de etiqueta é uma prensa hidráulica da marca Ciola, produzida no Brasil, com 60 toneladas de capacidade, modelo 1C-60BA, com mesa medindo 250 x 250 mm, curso de 150 mm, com abertura de 300 mm, mono velocidade e disparo bimanual, fabricada em 1976 e modernizada em 2014 para atender à norma de segurança NR-12 (Brasil, 2015).

A prensa hidráulica escolhida é um modelo existente em mais de um setor da planta de São Bernardo do Campo, dentre um total de mais de 120 máquinas, com capacidade operacional e aplicação industrial variadas. Foi decidido por se aplicar os estudos nesta máquina visando à potencial oportunidade de também se estender a metodologia às demais máquinas similares existentes.

5.1.3 Estudo da máquina em operação e seu processo de trabalho

Esta máquina é parte constituinte de uma célula de trabalho onde se realizam diversas operações por um único colaborador. A operação feita na máquina escolhida ajusta a circularidade de peças que são submetidas a operações subsequentes. A peça a ser trabalhada é um tubo com a extremidade circularmente imperfeita e após a operação de prensagem o tubo é removido da máquina pelo colaborador já com a sua circularidade dentro das especificações de projeto.

O colaborador, com o planejamento de produção em mãos, energiza todas as máquinas de sua célula no início de seu turno de trabalho e, à medida que um lote de peças passa por uma operação, elas são submetidas à operação seguinte, o que nesta máquina implica no posicionamento de cada peça individualmente na ferramenta e o acionamento simultâneo de dois botões para que sela seja prensada, desta forma ajustando sua circularidade para a dimensão requerida em projeto.

A máquina permanece ligada com o sistema hidráulico pressurizado e pronto para a próxima prensagem. Durante o processo em que a prensa permanece ligada a energia que não é utilizada em prensagem de peças é absorvida na forma de calor pelo fluido hidráulico circulante. Nesta etapa observa-se claramente a existência de oportunidade para melhoria de eficiência energética.

Nos períodos de observação foi possível notar que os lotes a serem processados são de quantidades relativamente pequenas de peças.

A Figura 36 ilustra o fluxograma da operação da máquina.

A máquina foi estudada durante uma semana típica de produção quando foram produzidas em média 336 peças por dia, ou seja, 168 peças por turno ou ainda 21 peças por hora em média.

A capacidade de produção da máquina estudada é muito maior do que sua solicitação. Estes fatores são inerentes à própria estrutura produtiva e à escala de produção da empresa. Assim, é constatado que a máquina operou com índices de produção abaixo de sua capacidade nominal.

Os custos de produção e o valor agregado de cada peça produzida são dados confidenciais da empresa que não podem ser divulgados.

Figura 36 - Fluxograma de operação da prensa Ciola 60t (fabricada em 1976)

Fonte: o autor

5.1.4 Estudo dos indicadores econômicos da máquina

Nesta etapa do trabalho de aplicação da MAAMEES foi aventada a possibilidade de se realizar a modelagem da máquina. Optou-se por fazer o estudo do consumo energético baseado exclusivamente no seu processo de operação.

Diante desses fatos os tomadores de decisão da empresa analisaram as duas possibilidades de modernização, STA e SEM. Em consulta ao mercado os investimentos para a alternativa STA são da ordem de R\$ 95.000,00. Assim diante dos valores e volumes de produção, foi decidida pelos gestores que fosse elaborada os estudos para a implantação da alternativa SEM.

5.1.5 Estimativa do consumo energético baseada exclusivamente na operação da máquina

A máquina é constituída de parte eletrônica de acionamento e também de componentes eletromecânicos, entretanto, é certo afirmar que o principal fator de consumo energético é o seu motor de 6 CV como se pode verificar na Figura 37.

Figura 37 - Fotografia da placa do motor da prensa Ciola 60t

Fonte: o autor

Os dados da placa do motor não indicam o seu fator de potência e não existe nenhuma informação dada pelo fabricante sobre o rendimento do motor. Também não existe nenhuma informação sobre se a potência efetiva é a realmente solicitada do motor.

Assim simplesmente converter a potência do motor em CV para KVA e dividir-se por um rendimento estimado da ordem de 60% pode levar a um cálculo muito impreciso. Desta forma, em especial se concluiu que não existem dados confiáveis para se fazer uma estimativa de consumo com base apenas nas informações disponíveis.

5.1.6 Medição do consumo energético da máquina em seu processo de trabalho

A coleta de dados do consumo de energia da máquina foi efetuada por meio da instalação de um medidor e registrador eletrônico trifásico de potência elétrica que foi acoplado ao circuito de energia da máquina de forma a medir e registrar os valores da potência elétrica total consumida ao longo do tempo em intervalos de 30 segundos. A Figura 38 ilustra a instalação do medidor.

Figura 38 - Esquema de instalação do medidor e registrador de potência elétrica

Fonte: o autor

Durante o período de coleta de dados a fábrica estava operando em dois turnos de trabalho por dia. Desta forma a fábrica opera 16 horas por dia.

Durante a coleta de dados a rotina dos operadores das máquinas foi exatamente seguida como nos dias anteriores: no início do primeiro turno a máquina era ligada e somente desligada no final do 2º turno.

A máquina era ligada por volta das 06:30 h e desligada por volta das 23:30 h.

A Tabela 8 apresenta os dados e a Figura 39 ilustram a potência demandada durante uma hora de operação após o acionamento da máquina no início do primeiro turno do primeiro dia da semana.

Tabela 8 - Dados obtidos de medições em 19/10/2015

DATA	HORARIO	P(W)	DATA	HORARIO	P(W)	DATA	HORARIO	P(W)
19/10/2015	06:36:00	0	19/10/2015	06:56:30	2222,266	19/10/2015	07:17:00	2112,891
19/10/2015	06:36:30	2125,00	19/10/2015	06:57:00	2215,625	19/10/2015	07:17:30	2111,328
19/10/2015	06:37:00	2402,734	19/10/2015	06:57:30	2216,016	19/10/2015	07:18:00	2118,359
19/10/2015	06:37:30	2380,859	19/10/2015	06:58:00	2215,625	19/10/2015	07:18:30	2118,359
19/10/2015	06:38:00	2366,797	19/10/2015	06:58:30	2209,375	19/10/2015	07:19:00	2110,547
19/10/2015	06:38:30	2364,453	19/10/2015	06:59:00	2205,078	19/10/2015	07:19:30	2106,25
19/10/2015	06:39:00	2361,328	19/10/2015	06:59:30	2201,953	19/10/2015	07:20:00	2106,25
19/10/2015	06:39:30	2351,172	19/10/2015	07:00:00	2198,438	19/10/2015	07:20:30	2106,25
19/10/2015	06:40:00	2343,359	19/10/2015	07:00:30	2198,047	19/10/2015	07:21:00	2106,25
19/10/2015	06:40:30	2337,109	19/10/2015	07:01:00	2198,438	19/10/2015	07:21:30	2106,25
19/10/2015	06:41:00	2332,422	19/10/2015	07:01:30	2199,609	19/10/2015	07:22:00	2106,25
19/10/2015	06:41:30	2327,734	19/10/2015	07:02:00	2201,172	19/10/2015	07:22:30	2106,25
19/10/2015	06:42:00	2323,828	19/10/2015	07:02:30	2195,703	19/10/2015	07:23:00	2106,25
19/10/2015	06:42:30	2321,484	19/10/2015	07:03:00	2189,453	19/10/2015	07:23:30	2106,25
19/10/2015	06:43:00	2316,016	19/10/2015	07:03:30	2184,375	19/10/2015	07:24:00	2106,25
19/10/2015	06:43:30	2309,375	19/10/2015	07:04:00	2179,688	19/10/2015	07:24:30	2106,25
19/10/2015	06:44:00	2303,906	19/10/2015	07:04:30	2176,953	19/10/2015	07:25:00	2106,25
19/10/2015	06:44:30	2301,953	19/10/2015	07:05:00	2176,172	19/10/2015	07:25:30	2106,25
19/10/2015	06:45:00	2300,000	19/10/2015	07:05:30	2171,484	19/10/2015	07:26:00	2106,25
19/10/2015	06:45:30	2297,266	19/10/2015	07:06:00	2168,750	19/10/2015	07:26:30	2106,25
19/10/2015	06:46:00	2294,531	19/10/2015	07:06:30	2168,75	19/10/2015	07:27:00	2106,25
19/10/2015	06:46:30	2289,453	19/10/2015	07:07:00	2166,016	19/10/2015	07:27:30	2106,25
19/10/2015	06:47:00	2284,766	19/10/2015	07:07:30	2160,938	19/10/2015	07:28:00	2106,25
19/10/2015	06:47:30	2285,938	19/10/2015	07:08:00	2160,156	19/10/2015	07:28:30	2106,25
19/10/2015	06:48:00	2280,469	19/10/2015	07:08:30	2155,859	19/10/2015	07:29:00	2106,25
19/10/2015	06:48:30	2274,219	19/10/2015	07:09:00	2154,688	19/10/2015	07:29:30	2106,25
19/10/2015	06:49:00	2270,313	19/10/2015	07:09:30	2146,484	19/10/2015	07:30:00	2106,25
19/10/2015	06:49:30	2269,531	19/10/2015	07:10:00	2144,922	19/10/2015	07:30:30	2106,25
19/10/2015	06:50:00	2264,844	19/10/2015	07:10:30	2140,625	19/10/2015	07:31:00	2106,25
19/10/2015	06:50:30	2257,031	19/10/2015	07:11:00	2138,672	19/10/2015	07:31:30	2106,25
19/10/2015	06:51:00	2253,516	19/10/2015	07:11:30	2139,063	19/10/2015	07:32:00	2106,25
19/10/2015	06:51:30	2251,563	19/10/2015	07:12:00	2141,406	19/10/2015	07:32:30	2106,25
19/10/2015	06:52:00	2250,781	19/10/2015	07:12:30	2138,672	19/10/2015	07:33:00	2106,25
19/10/2015	06:52:30	2249,219	19/10/2015	07:13:00	2132,813	19/10/2015	07:33:30	2106,25
19/10/2015	06:53:00	2244,141	19/10/2015	07:13:30	2130,469	19/10/2015	07:34:00	2106,25
19/10/2015	06:53:30	2237,500	19/10/2015	07:14:00	2120,703	19/10/2015	07:34:30	2106,25
19/10/2015	06:54:00	2238,281	19/10/2015	07:14:30	2123,438	19/10/2015	07:35:00	2106,25
19/10/2015	06:54:30	2233,984	19/10/2015	07:15:00	2121,875	19/10/2015	07:35:30	2106,25
19/10/2015	06:55:00	2228,906	19/10/2015	07:15:30	2120,313	19/10/2015	07:36:00	2106,25
19/10/2015	06:55:30	2227,344	19/10/2015	07:16:00	2120,703			
19/10/2015	06:56:00	2227,344	19/10/2015	07:16:30	2119,141			

Fonte: Medições efetuadas na planta industrial

Observe-se que a potência demandada inicial da máquina em regime de trabalho é de 2.402,734 W e que aproximadamente uma hora depois de acionada a potência demandada é de 2106,25W. Esta redução de consumo energético deve-se principalmente ao fato do fluido hidráulico ficar aquecido e, portanto, ter reduzido o seu coeficiente de viscosidade.

Observe-se que a demanda média em uma hora sem produção foi aproximadamente de 2,167 kW.

Figura 39 - Gráfico da amostra de dados obtidos de medições em 19/10/2015

Fonte: o autor

Assim, pode-se constatar que a máquina aquecida e operando em vazio demanda uma potência da rede elétrica 12,22% menor do que ela demanda quando no início da operação. Tal constatação é importante e pode ser levada em conta quando for feita a estimativa do ganho energético ao serem consideradas as soluções SEM. e STA Entretanto, para os propósitos desta tese optou-se por se considerar o valor do consumo médio de energia.

A Tabela 9 e a Figura 40 ilustram, respectivamente, os dados e o gráfico de consumo durante o período das 22:18 h até as 23:18 h, quando a máquina foi solicitada na prensagem de peças. Nesta condição, após quase dois turnos de trabalho a potência demandada em regime de espera ficou por volta de 1,92 kW. A demanda média neste período foi de 1,965 kW. Observe-se que os picos de consumo durante a prensagem de peças são da ordem de 2,129 kW, ou seja aproximadamente 8,3% acima da demanda média requerida.

Tabela 9 - Dados obtidos de medições em 19/10/2015

DATA	HORARIO	P(W)	DATA	HORARIO	P(W)	DATA	HORARIO	P(W)
19/10/2015	22:17:00	2005,078	19/10/2015	22:38:00	1966,016	19/10/2015	22:59:00	1943,359
19/10/2015	22:17:30	2042,578	19/10/2015	22:38:30	1964,453	19/10/2015	22:59:30	1942,578
19/10/2015	22:18:00	1986,328	19/10/2015	22:39:00	1964,063	19/10/2015	23:00:00	1938,281
19/10/2015	22:18:30	2073,438	19/10/2015	22:39:30	1971,094	19/10/2015	23:00:30	1936,328
19/10/2015	22:19:00	1971,484	19/10/2015	22:40:00	2129,297	19/10/2015	23:01:00	1936,328
19/10/2015	22:19:30	1966,016	19/10/2015	22:40:30	1980,859	19/10/2015	23:01:30	1937,5
19/10/2015	22:20:00	1964,453	19/10/2015	22:41:00	1978,516	19/10/2015	23:02:00	1937,109
19/10/2015	22:20:30	1964,063	19/10/2015	22:41:30	2018,75	19/10/2015	23:02:30	1935,156
19/10/2015	22:21:00	1971,094	19/10/2015	22:42:00	1972,656	19/10/2015	23:03:00	1941,016
19/10/2015	22:21:30	2129,297	19/10/2015	22:42:30	2023,047	19/10/2015	23:03:30	1938,672
19/10/2015	22:22:00	1980,859	19/10/2015	22:43:00	1969,141	19/10/2015	23:04:00	1936,719
19/10/2015	22:22:30	1978,516	19/10/2015	22:43:30	1962,891	19/10/2015	23:04:30	1934,766
19/10/2015	22:23:00	2018,75	19/10/2015	22:44:00	2061,328	19/10/2015	23:05:00	1932,422
19/10/2015	22:23:30	1972,656	19/10/2015	22:44:30	1967,969	19/10/2015	23:05:30	1933,203
19/10/2015	22:24:00	2023,047	19/10/2015	22:45:00	1954,688	19/10/2015	23:06:00	1935,547
19/10/2015	22:24:30	1969,141	19/10/2015	22:45:30	1963,281	19/10/2015	23:06:30	1937,5
19/10/2015	22:25:00	1962,891	19/10/2015	22:46:00	1965,234	19/10/2015	23:07:00	1927,344
19/10/2015	22:25:30	2061,328	19/10/2015	22:46:30	1966,797	19/10/2015	23:07:30	1924,219
19/10/2015	22:26:00	1967,969	19/10/2015	22:47:00	1969,922	19/10/2015	23:08:00	1925,781
19/10/2015	22:26:30	1954,688	19/10/2015	22:47:30	1957,031	19/10/2015	23:08:30	1927,734
19/10/2015	22:27:00	1963,281	19/10/2015	22:48:00	2046,875	19/10/2015	23:09:00	1927,734
19/10/2015	22:27:30	1965,234	19/10/2015	22:48:30	1950,781	19/10/2015	23:09:30	1926,563
19/10/2015	22:28:00	1966,797	19/10/2015	22:49:00	1953,125	19/10/2015	23:10:00	1921,875
19/10/2015	22:28:30	1969,922	19/10/2015	22:49:30	2038,672	19/10/2015	23:10:30	1917,969
19/10/2015	22:29:00	1957,031	19/10/2015	22:50:00	1953,906	19/10/2015	23:11:00	1918,75
19/10/2015	22:29:30	2046,875	19/10/2015	22:50:30	2010,547	19/10/2015	23:11:30	1917,969
19/10/2015	22:30:00	1950,781	19/10/2015	22:51:00	1946,484	19/10/2015	23:12:00	1919,922
19/10/2015	22:30:30	1953,125	19/10/2015	22:51:30	1948,828	19/10/2015	23:12:30	1915,625
19/10/2015	22:31:00	2038,672	19/10/2015	22:52:00	1988,281	19/10/2015	23:13:00	1918,75
19/10/2015	22:31:30	1953,906	19/10/2015	22:52:30	1946,094	19/10/2015	23:13:30	1920,313
19/10/2015	22:32:00	2010,547	19/10/2015	22:53:00	1985,938	19/10/2015	23:14:00	1923,047
19/10/2015	22:32:30	1946,484	19/10/2015	22:53:30	1944,141	19/10/2015	23:14:30	1921,875
19/10/2015	22:33:00	1948,828	19/10/2015	22:54:00	1992,578	19/10/2015	23:15:00	1919,922
19/10/2015	22:33:30	1988,281	19/10/2015	22:54:30	1955,469	19/10/2015	23:15:30	1920,703
19/10/2015	22:34:00	1946,094	19/10/2015	22:55:00	1951,953	19/10/2015	23:16:00	1921,875
19/10/2015	22:34:30	1985,938	19/10/2015	22:55:30	2028,906	19/10/2015	23:16:30	1918,75
19/10/2015	22:35:00	1944,141	19/10/2015	22:56:00	1941,406	19/10/2015	23:17:00	1917,188
19/10/2015	22:35:30	2005,078	19/10/2015	22:56:30	1942,969	19/10/2015	23:17:30	1914,844
19/10/2015	22:36:00	2042,578	19/10/2015	22:57:00	1942,969	19/10/2015	23:18:00	1919,141
19/10/2015	22:36:30	1986,328	19/10/2015	22:57:30	1944,141	19/10/2015	23:18:30	1598,047
19/10/2015	22:37:00	2073,438	19/10/2015	22:58:00	1943,75	19/10/2015	23:19:00	0
19/10/2015	22:37:30	1971,484	19/10/2015	22:58:30	1944,922			

Fonte: Medições efetuadas na planta industrial

Os dados da Tabela 9 e o gráfico da Figura 40 ilustram os resultados das medições realizadas entre as 22:17 h e 23:19 h do dia 19/10/2015, sendo possível observar também, além da redução da potência necessária ao funcionamento do sistema devido ao aquecimento do fluido hidráulico resultante da energia não utilizada em produção, pequenos picos de energia adicional que ocorrem nos instantes em que a máquina está em execução de trabalho efetivo.

Figura 40 - Gráfico da amostra de dados obtidos de medições em 19/10/2015

Fonte: o autor

Entretanto, a demanda média consumida pela máquina durante uma hora de operação, quando foram produzidas 39 peças, foi de 1,9656 kW. Ou seja, praticamente a mesma energia da máquina operando em vazio.

A máquina tem capacidade para produzir 5.760 peças por dia.

Os dois intervalos de tempo que são mostrados nesta tese de doutorado retratam os dois períodos mais significativos em relação ao volume produzido.

Isto porque no período ilustrado na Tabela 8 e Figura 39 a solicitação da máquina para a produção de peças foi zero.

Já no período ilustrado na Tabela 9 e na Figura 40 foi quando a máquina mais peças produziu. Neste período a produção foi de 39 peças.

Assim pode-se afirmar que a produção de peças impacta muito pouco o consumo da máquina.

Durante as 120 horas totais de medição durante a semana a máquina operou por cerca de 80 horas, devido aos dois turnos. Durante as oitenta horas de operação o consumo médio por hora registrado foi da ordem de 2,03KWh.

Neste mesmo período a produção foi de 1.680 peças ou 336 peças por dia.

Ou seja, pode-se definir o indicador de produtividade real medido no período de uma semana de cinco dias úteis como 1.680 peças/162,4 kWh ou por hora 21 peças/2,03 kWh ou ainda 10,34 peças por kWh.

O tempo de colocação da peça, prensagem e remoção de cada peça é de no máximo 10 segundos. Assim a capacidade de produção dessa máquina pode ser

entendida na ordem de 360 peças por hora. Ou seja, em termos energéticos a produtividade dessa máquina poderia ser 360 peças/2,03KWh por hora, ou seja 177,3 peças por kWh.

Assim fica evidente que a eficiência energética medida é aproximadamente 94% inferior ao que poderia ser se a máquina fosse plenamente utilizada ou se a máquina fosse desligada durante os períodos de não produção.

5.1.7 Análise do consumo medido e tomada de decisão entre SEM e STA

Como a chegada de peças não atende um parâmetro regular o consumo de energia da máquina não foi estimado devido à falta de informações técnicas confiáveis. Assim a aplicação da MAAMEES prosseguiu com base nos dados reais do consumo e chegou ao ponto de tomada de decisão pelos gestores sobre qual alternativa de melhoria de eficiência energética: SEM ou a STA.

A análise do volume de produção e do valor da contribuição de cada peça aos produtos finais que são ônibus e caminhões fez com que os gestores optassem pela SEM.

5.1.8 Projeto da SEM e estimativa do novo consumo

Observe-se que os padrões de segurança da norma NR12 deverão permanecer.

Nesta fase foi projetada a solução SEM. Para o caso em questão o projeto da alternativa SEM demanda apenas a inclusão de novas rotinas de controle no software já existente no CLP. Essas novas rotinas de controle podem ser traduzidas como a reprogramação parcial do CLP sem a necessidade de adicionamento de nenhum novo sensor ou botoeira.

A Figura 41 ilustra o fluxograma de controle da máquina com a aplicação da SEM.

Observe-se que a solução SEM não foi ainda implementada. Porém, a estimativa indica uma redução de consumo neste caso da ordem de 90% em relação à máquina com sistema hidráulico convencional e operada em sua rotina usual.

Figura 41 - Fluxograma de controle da máquina aplicada a SEM

Fonte: o autor

A máquina estudada, conforme descrito no item 5.1.6, pode produzir até 360 peças por hora. Entretanto a produção média no período analisado ficou em torno de 21 peças por hora. Assim, pode-se concluir que a mesma é utilizada apenas aproximadamente 6% do seu tempo de operação. Com a implementação da SEM a máquina é desligada após 90 segundos de operação em vazio. O processo de chegada de peças se dá na forma de transporte por meio de engradados contendo normalmente trinta peças por engradado. O estudo do modelo de produção da fábrica também constatou uma grande aleatoriedade nos intervalos de chegada dos engradados.

Devido à variabilidade do processo de chegada das peças não é possível estimar com exatidão o consumo de energia, assim este trabalho de pesquisa estimou a economia de energia possível baseando-se em dois comportamentos de extrema solicitação da máquina: os cenários A e B.

Cenário A: comportamento de solicitação constante baseada na média de produção. O comportamento da máquina nesse cenário supõe uma razão constante da taxa de

chegada de 21 peças por hora, ou seja, aproximadamente uma peça a cada 171 segundos. Adotando-se para fins deste estudo que esse comportamento da planta produtiva entre a chegada de uma peça e outra é correto, haverá um intervalo de 171 segundos entre uma peça e a seguinte. Como o algoritmo de controle proposto comanda o desligamento a cada 90 segundos de espera, nesta situação operacional hipotética a máquina seria desligada algo em torno de 40% do seu tempo normal de produção. Nesta estimativa já foram considerados os tempos de estabilização durante o acionamento. É importante destacar, contudo, que este cenário é pouco factível na realidade prática da indústria.

Cenário B: comportamento de solicitações com a chegada do lote todo com o volume completo da programação diária. Neste cenário considera-se que chegam 336 peças quase ao mesmo tempo. Dessa maneira, forma-se uma fila onde as peças passam a ser processadas uma após a outra. Como a capacidade da máquina é de 360 peças por hora, ou seja, 10 segundos por peça, serão necessários 3.360 segundos ou 56 minutos de operação para a produção de todas as 336 peças. Dessa forma a máquina ficaria somente ligada por cerca de uma hora das 16 horas dos dois turnos. Ou seja, ficaria ligada somente 6,25% do tempo de produção. Se o consumo total da máquina a cada dois turnos é de 32,5 KWh, o consumo horário estimado neste caso seria de 2,03 KWh.

Assim, considerando o cenário A e o cenário B a faixa de redução de consumo ficaria entre 40% e 93,75%. A Tabela 10 ilustra os dados de ganhos energéticos para os dois cenários com a implantação da SEM.

Tabela 10 - Cenários possíveis de economia de energia com a implantação da SEM

Implantação SEM	Redução do Consumo Energético	Economia em KWh (Média Horária)
Cenário A	40%	0,81
Cenário B	94%	1,91

Fonte: o autor

Observe-se que os resultados esperados para os dois casos são muito satisfatórios, de modo que os executivos responsáveis pela tomada de decisão na empresa optaram pela implantação da SEM. Esta decisão fez com que esse projeto de engenharia entrasse para o cronograma de eficiência energética da organização.

5.1.9 Análise econômica da aplicação da MAAMEES com a SEM

A análise de viabilidade deve ser feita com a aplicação dos conhecidos métodos de análise econômico-financeira, como o VPL, a TIR e o PB, cuja explanação teórica se encontra no Anexo A desta tese.

No presente trabalho de pesquisa poder-se-iam estudar economicamente os dois cenários, A e B, apresentados na Tabela 10, pois ambos demonstram ganhos energéticos para a empresa. Entretanto, o cenário A é na prática pouco provável. Isto porque ele implica na utilização de recursos humanos dedicados exclusivamente para abastecer a prensa com intervalos de tempo constantes. A observação da produção no período constatou a solicitação da prensa devido à chegada de peças aproximando-se do cenário B. Assim para se obter uma estimativa mais realista e menos otimista optou-se por adotar um cenário C exclusivamente para a análise econômico-financeira, onde a redução de consumo de energia considerada será de 90%.

Os seguintes dados foram considerados: valor médio da energia industrial no Brasil: R\$ 403,8 por MWh (AGENCIA BRASIL, 2017); o tempo de ciclo de cada operação é de 10 segundos. Estimativa de valor da máquina Ciola 60 T no mercado (2017) é de R\$ 40.000,00. A título de referência, a estimativa do investimento em hardware necessário para a STA, no caso da empresa estudada, considerando-se para tal um sistema Voith/Siemens de conversão de prensa hidráulica convencional para servo bomba de alta eficiência energética, é cerca de R\$ 95.000,00 (dados de maio de 2017). Estimativa do valor médio da hora de programação de sistema para a SEM: R\$187,53; estimativa da Taxa de Juros para a Indústria: 13,0% ao ano (Brasil, 2017).

Na situação original, a máquina hidráulica estudada consumia continuamente 2,03 kWh por hora em média. A Tabela 10 revela que, com a implementação da S.E.M., no cenário A, este consumo foi reduzido em 0,81 kWh por hora e, no cenário B, este consumo foi reduzido em 1,91 kWh por hora. Isto significa que a empresa gastava um valor superior a R\$ 3.173,00 por ano em energia na máquina estudada, o qual, mantendo-se o mesmo nível de produção e volume de peças, pôde ser reduzido para cerca de R\$ 1.900,00 por ano no cenário A, para cerca de R\$ 190,00 no cenário B. e para cerca de R\$ 317,00 no cenário C.

No caso específico da máquina aqui estudada, a produção foi mantida no mesmo nível, porém, com a aplicação da versão SEM da MAAMEES, o gasto energético foi substancialmente reduzido.

Para esse estudo, foi considerado o valor dos investimentos iniciais necessários como de R\$ 4.688,25, resultado dos gastos que a empresa tem que fazer para realizar a adaptação no software da máquina estudada, o que demandará 25,5 horas de trabalho, testes e a implementação. Esses investimentos são válidos para uma primeira máquina e serão considerados de forma linear quando se estender a análise para mais de uma máquina, conforme se verá adiante, embora se saiba que se podem obter ganhos de escala quando se aplica um mesmo processo para um conjunto de máquinas hidráulicas semelhantes.

A Tabela 11 resume alguns indicadores dos resultados estimados na aplicação da SEM na máquina em estudo, com destaque para a expressiva economia energética da ordem de 90% do consumo original (cenário C).

Tabela 11 - Resultados reais e simulados na máquina estudada

Resultados para a Máquina Estudada	Consumo Energético em 365 dias (MWh)	Custo Energético Anual (R\$)	Economia Monetária (R\$)
Situação <i>ex-ante</i>	7,86	3.173,87	-
Situação <i>ex-post</i>	0,786	317,39	2.856,48

Fonte: o autor

Inicialmente, a máquina demandava 7,9 MWh por ano em sua operação, ao custo de mais de R\$3.173,00, porém, com a aplicação da MAAMEES e particularmente da SEM, foi possível reduzir este consumo energético para apenas 0,79MWh por ano, proporcionando uma economia monetária da ordem de mais de R\$2.856,00 apenas para uma máquina. A partir de um investimento pouco superior a R\$4.600,00 a empresa obteve em termos de redução do consumo energético uma economia de custos superior a R\$2.856,00 ao ano, para uma máquina com vida útil superior a 10 anos. Com esses dados é possível realizar a análise de viabilidade econômica da implementação da SEM em uma ou mais máquinas similares existentes na organização onde se deu o experimento. Para tanto serão utilizados os métodos de avaliação PB, VPL e TIR. A aplicação desses métodos requer que se eleja uma taxa de juros de referência, tendo sido escolhida a SELIC, taxa divulgada pelo Banco

Central do Brasil, do mês de fevereiro de 2017, a qual se situava em 13% ao ano.

Também, como resultado das simulações realizadas, foi possível construir a Tabela 12 contendo as demonstrações de resultados simulados para cinco diferentes cenários onde se considerou uma máquina e estenderam-se os resultados até cem máquinas hidráulicas similares.

Tabela 12 - Demonstração de resultados para cenários simulados

Cenário			Receita anual	Custo	Resultado líquido
Cenário 1	1	máquina com as características analisadas	R\$ 2.856,48	R\$ 4.468,25	-R\$ 1.831,77
Cenário 2	5	máquinas similares	R\$ 14.282,41	R\$ 6.563,55	R\$ 7.718,86
Cenário 3	10	máquinas similares	R\$ 28.564,81	R\$ 8.438,85	R\$ 20.125,96
Cenário 4	50	máquinas similares	R\$ 142.824,06	R\$ 23.441,25	R\$ 119.382,81
Cenário 5	100	máquinas similares	R\$ 285.648,12	R\$ 42.194,25	R\$ 243.453,87

Fonte: o autor

Fazendo-se uma extensão linear do resultado encontrado na simulação para uma máquina, foi possível ver já a partir de cinco máquinas que a empresa tem seus custos com a SEM diluídos e obtém resultado líquido positivo e continuamente crescente. Aplicando-se a SEM a cinco máquinas similares, a empresa obtém um ganho de R\$ 7,7 mil por ano, o que alcança mais de R\$ 243 mil quando se estende a aplicação da SEM para 100 máquinas hidráulicas similares.

Fazendo uso destas informações contábeis e financeiras, obtidas através de simulação, é possível aplicar os métodos previamente mencionados para a análise de viabilidade.

É importante mencionar que a despeito da economia brasileira apresentar certo nível de inflação, os fluxos de caixa para a análise de viabilidade nesta tese serão considerados nominalmente, isto é, desconsiderando a existência da inflação, procedimento este plenamente aceitável sob certas circunstâncias conforme Hazzan e Pompeo (2004).

Para o método do *payback* simples tanto a inflação quanto a taxa de juros não tem qualquer importância, pois a análise é apenas nominal, verificando-se em quanto tempo a empresa consegue recuperar o investimento realizado na aplicação do SEM. Na Tabela 13 é possível ver que os recursos empregados em apenas uma máquina levariam aproximadamente 18 meses para serem recuperados, porém já a partir de cinco máquinas o tempo de recuperação do investimento cai para menos de seis meses, mostrando plena viabilidade na aplicação da SEM, do ponto de vista

do método PB. É importante destacar que no cenário onde se aplica a SEM para um parque de 100 máquinas hidráulicas similares, o período de *payback* se reduz drasticamente a menos de dois meses.

Tabela 13 - Análise de viabilidade pelo período de *payback* simples

Cenário	Payback simples	
	Meses	Anos
1	19,7	1,64
2	5,51	0,46
3	3,55	0,30
4	1,97	0,16
5	1,77	0,15

Fonte: o autor

Na Tabela 14 é possível ver o fluxo de caixa nominal para um período de cinco anos, aplicados a cada um dos cinco cenários definidos na Tabela 12. A aplicação da SEM para apenas uma máquina já apresenta Valor Presente Líquido (numa economia com taxa de juros de 13% ao ano) positivo, com TIR da magnitude de 54% ao ano, o que mostra a plena viabilidade para sua implementação, com as condições consideradas na simulação.

Tabela 14 - Fluxos de caixa simulados e resultados do VPL e TIR

Cenário	V.P.L.	T.I.R.	MAQ	0	1	2	3	4	5
1	R\$ 4.742,17	54%	1	-R\$ 4.688,25	R\$ 2.856,48	R\$ 2.856,48	R\$ 2.856,48	R\$ 2.856,48	R\$ 2.856,48
2	R\$ 64.848,48	217%	5	-R\$ 6.563,55	R\$ 14.282,41	R\$ 14.282,41	R\$ 14.282,41	R\$ 14.282,41	R\$ 14.282,41
3	R\$ 134.385,21	338%	10	-R\$ 8.438,85	R\$ 28.564,81	R\$ 28.564,81	R\$ 28.564,81	R\$ 28.564,81	R\$ 28.564,81
4	R\$ 690.679,05	609%	50	-R\$ 23.441,25	R\$ 142.824,06	R\$ 142.824,06	R\$ 142.824,06	R\$ 142.824,06	R\$ 142.824,06
5	R\$ 1.386.046,35	677%	100	-R\$ 42.194,25	R\$ 285.648,12	R\$ 285.648,12	R\$ 285.648,12	R\$ 285.648,12	R\$ 285.648,12

Fonte: o autor

Quando se estende a aplicação da SEM para cada um dos cinco cenários seguintes a situação melhora sensivelmente, com o VPL alcançando quase R\$ 1,4 milhão para o caso de 100 máquinas, com TIR de 677% ao ano.

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de análise de viabilidade comprovam que a aplicação da SEM é viável não apenas para uma máquina como para diferentes cenários onde se faria a sua aplicação para um número maior de equipamentos hidráulicos similares na planta industrial.

5.2 Aplicação da MAAMEES por Simulação em Caráter Experimental em Planta de Cliente Voith na Alemanha

A fábrica do cliente da Voith, na Alemanha, que devido a contrato de confidencialidade não permite a plena divulgação de informações, possui diversas máquinas hidráulicas.

Uma dessas máquinas foi objeto do experimento de aplicação da MAAMEES, por simulação, na versão STA, seguindo os passos definidos no fluxograma apresentado nas Figuras 29 e 30, as quais contem a análise *ex-ante*, a Implementação e a análise *ex-post*.

5.2.1 Macro Etapa I: análise *ex-ante*

Obedecendo por simulação ao fluxograma das Figuras 29 e 30, os técnicos da empresa realizaram um diagnóstico preliminar, por meio do qual identificaram a máquina objeto dos estudos e destacaram eventuais oportunidades de melhoria de eficiência energética.

5.2.2 Identificação da máquina e oportunidade de melhoria de eficiência energética

Na planta industrial, na Alemanha, foi escolhida uma prensa de 4.000 kN. Esta prensa, ilustrada na Figura 42, era uma máquina hidráulica convencional.

Figura 42 - Fotografia da prensa de 4.000 kN

Fonte: Voith (2017)

5.2.3 Estudo da máquina em operação e seu processo de trabalho

A máquina estudada é uma prensa hidráulica que opera com quatro pistões, sendo que três pistões exercem força em sentido oposto ao quarto pistão. A Figura 43 ilustra parcialmente a configuração dos pistões dessa prensa.

Figura 43 - Configuração dos pistões da prensa de 4.000 kN

Fonte: Adaptado de Voith (2017)

O fluxograma de operação da máquina hidráulica que opera com quatro pistões está apresentado na Figura 44.

Figura 44 - Fluxograma de operação da prensa de 4.000 kN

Fonte: o autor

A Figura 43 permite observar que se trata de uma máquina hidráulica convencional com três pistões principais e um adicional na almofada de trabalho. As peças são trabalhadas pelo funcionamento simultâneo dos pistões mediante o acionamento pelo operador.

5.2.4 Estudo dos indicadores econômicos da máquina

A máquina foi estudada em sua produção anual e semanal média. Esta prensa hidráulica está alocada na produção de peças de três tipos distintos de produtos: peças tipo A, peças tipo B e peças tipo C.

Os detalhes construtivos e as características operacionais dos três tipos de peças não são relevantes para este trabalho de pesquisa. Entretanto sabe-se que a peça do tipo A demanda 9,33 segundos para ser produzida, a peça do tipo B demanda 4,5 segundos e a peça do tipo C demanda 9,0 segundos.

A Tabela 15 apresenta os dados de capacidade produtiva nominal para os três tipos de peças em diferentes períodos. Observe-se que estes tempos incluem os tempos de colocação e retirada das peças na máquina.

Tabela 15 - Capacidade nominal no tempo por tipo de peça

Tempo Tipo de peça	Hora	Turno 8 h	Dia/3 turnos	Semana/5 dias úteis	Ano/50 semanas úteis
A	385	3.080	9.240	46.200	2.310.000
B	800	6.400	19.200	96.000	4.800.000
C	400	3.200	9.600	48.000	2.400.000

Fonte: o autor

As produções do ano de 2016 das três peças, tipo A, tipo B e tipo C, foram respectivamente: 577.500; 1.200.000 e 600.000 unidades de cada tipo. Assim como também descrito no item 5.1.4 desta tese, os custos de produção e o valor agregado de cada peça produzida são dados confidenciais da empresa que não estão disponíveis e que também não podem ser divulgados.

Como na ocasião da modernização da prensa hidráulica da MBB foi aventada a possibilidade de se realizar a modelagem da máquina, a equipe de engenharia optou por fazer os estudos do consumo energético baseados exclusivamente no seu processo de fabricação.

5.2.5 Estimativa do consumo energético baseada exclusivamente na operação da máquina

A máquina também é constituída de componentes eletrônicos, mecânicos e eletromecânicos. Sabe-se que a demanda média dessa máquina hidráulica é algo em torno de 11 kW contínuos. A equipe de engenheiros da Alemanha informou que optou por não fazer a estimativa do consumo baseada exclusivamente na operação da máquina.

5.2.6 Medição do consumo energético da máquina em seu processo de trabalho

A coleta de dados do consumo de energia da máquina foi efetuada por meio da instalação de um medidor e registrador eletrônico trifásico de potência elétrica que foi acoplado ao circuito de energia da máquina de forma a medir e registrar os valores da potência elétrica total consumida ao longo do tempo em intervalos regulares. A Figura 45 ilustra a instalação do medidor.

Figura 45 - Esquema de instalação do medidor e registrador de potência elétrica

Fonte: o autor

Durante o período da coleta de dados a máquina estava operando em três turnos trabalho por dia, ou seja, a máquina permanecia ligada 24 horas por dia e 120 horas por semana. Foi observado que independentemente do tipo de peça produzido o consumo semanal foi de 1.320 kWh, significando que a prensa consumiu 264 kWh por dia, 88 kWh por turno ou 11 kWh por hora.

Essas medições foram realizadas ao longo do ano de 2016 onde o consumo anual da máquina foi de 66.000 kWh. Os dados de produção e de consumo energético indicam três índices de produtividade: 8,8 peças por kWh para as peças do tipo A, 18,2 peças por kWh para as peças do tipo B e 9,1 peças por kWh para as peças do tipo C.

Entretanto se a prensa estivesse sendo operada a 100% de sua capacidade operacional os indicadores energéticos seriam: 35 peças por kWh, 72,7 peças por kWh e 36,4 peças por kWh respectivamente. Assim fica constatado que a eficiência energética aferida desta prensa para os três tipos de peças situa-se algo em torno de 25%.

5.2.7 Análise do consumo medido e tomada de decisão entre SEM e STA

Baseados nos dados obtidos nas etapas anteriores, a equipe tomadora de decisão analisou as duas possibilidades de modernização previstas na MAAMEES, a STA e a SEM.

No caso da máquina do cliente Voith na Alemanha o volume de produção e o valor agregado da produção é indubitavelmente maior que no caso da prensa estudada na MBB. Dessa forma a rotina de controle que desliga a máquina quando o tempo de espera entre peças for maior do que 90 segundos não atende às expectativas de redução do consumo de energia. Em função do elevado volume de peças produzido pela prensa e seu valor agregado, a equipe gestora do projeto optou por aplicar a MAAMEES em sua versão STA.

5.2.8 Projeto da STA e estimativa do novo consumo

O projeto da solução STA para a prensa hidráulica escolhida obedeceu à mesma arquitetura básica ilustrada na Figura 31 e descrita no item 4.4.1 desta tese de doutorado.

A Figura 46 ilustra o fluxograma de controle da máquina com a aplicação da STA, onde se observa que a prensa ao ser ligada funciona apenas em sua parte eletrônica, permanecendo com o motor de passo inativo até ser acionado pelo operador no momento de executar uma operação de prensagem. O motor se desliga assim que termina a operação, ficando apenas a parte eletrônica da máquina ligada até que uma nova peça seja posicionada e o processo seja iniciado novamente pelo acionamento feito pelo operador.

Conforme descrito no item 5.2.6 esta prensa estava operando com uma eficiência média de 25%. Com a implantação da STA, a solicitação de prensa pelo setor de planejamento e controle de produção continua a mesma. Entretanto, a potência elétrica demandada pelo motor de passo somente é observada no instante efetivo do trabalho mecânico da prensa. Este instante está demonstrado na Figura 11 desta tese. Os instantes de aceleração, descida rápida e frenagem não demandam muita potência do motor, já as etapas de estampagem 1, estampagem 2 e retenção de pressão são os instantes de maior demanda de potência mecânica do motor.

Figura 46 - Fluxograma de operação da prensa de 4.000 kN com STA

Fonte: o autor

A análise total do ciclo permite concluir que os tempos de prensagem 1, estapagem 1 e retenção de pressão correspondem aproximadamente, em média, a 15% do tempo de um ciclo de prensagem considerando os tempos de espera usuais. Esses tempos variam conforme as solicitações de cada peça.

Assim sendo existe um espaço de economia de energia se o motor de passo apenas opera nos instantes de trabalho efetivo. Como os tempos são muito variáveis e como a máquina com a STA permanece ligada, não existe a possibilidade de fazer uma estimativa da redução do consumo muito precisa. Entretanto, é possível supor que a redução estimada de consumo de energia deverá ficar entre 60% e 80%. Como os dados de redução de consumo foram muito favoráveis no decorrer do projeto, o grupo gestor decidiu que a alternativa STA fosse implementada.

5.2.9 Implantação da MAAMEES com a STA, medição do consumo e análise dos resultados

A STA foi colocada em operação e foi verificado se o desempenho mecânico para a produção de peças continuava o mesmo. Foi realizado também um rígido controle de qualidade e de conformidade com as novas peças produzidas. Uma vez que do ponto de vista operacional a alternativa STA foi aprovada, foi novamente instalado o medidor de consumo elétrico para se realizar novas medições e a confrontação entre o consumo estimado e o consumo real. Estas medições foram efetuadas durante um mês do primeiro semestre de 2017 e os dados do novo consumo estão ilustrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados de eficiência energética com aplicação da STA

Peça	Consumo de energia	Redução
A	1.350 kWh	75%
B	800 kWh	86%
C	1.367 kWh	76%

Fonte: Adaptado de Voith (2017)

Observe-se que a redução do consumo ficou dentro da margem esperada, com 75% para a peça A, 86% para a peça B e 76% para a peça C. O volume mensal de produção durante as medições foi praticamente o mesmo e a eficiência energética da prensa com a STA alcançou ganhos significativos, passando, no caso da peça A, para 35 peças por kWh, para a peça B, 73 peças por kWh e para a peça C foi de 36 peças por kWh.

5.2.10 Análise econômica da aplicação da MAAMEES com a STA

As condições consideradas para o cálculo da melhoria de eficiência do consumo energético dessa prensa enquanto operando com a sua hidráulica convencional é de aproximadamente 11 kW contínuos. Adicionalmente são considerados os seguintes parâmetros de trabalho: três turnos, cinco dias úteis por semana e 50 semanas por ano. A aplicação da STA resultou em custo médio de energia por unidade produzida na operação para o ciclo 1 de € 0,54, para o ciclo 2 de € 0,32 e para o ciclo 3 de € 0,52.

As expectativas da organização de que a MAAMEES possa contribuir para a redução do custo médio operacional de energia, preservando-se inalterados os volumes de produção, foram confirmadas, pois a máquina hidráulica em sua configuração convencional resulta em um consumo energético anual de 66.000 kWh, que representa um custo anual com energia de € 13.200,00.

Tabela 17 - Resultados de consumo energético, redução de custos e *payback* com aplicação da STA

Peça	Consumo de Energia Anual	Economia Anual	<i>payback</i> simples
A	16.200 kWh	€ 9.960	1,75 anos
B	9.600 kWh	€ 11.280	1,5 anos
C	15.600 kWh	€ 10.080	1,7 anos

Fonte: Voith (2017)

Conforme é possível observar na Tabela 17, a aplicação da MAAMEES na versão STA promoveu a redução de custos para todas as peças estudadas, observando-se economia anual de energia de € 9.960, € 11.280 e €10.080 respectivamente para as peças do tipo A, B e C.

Os cálculos originais, por peça, mostraram que essas reduções de custo proporcionam à empresa prazos de *payback* simples, quando confrontados os investimentos feitos versus os ganhos obtidos, de 1,75 anos para a fabricação de peças tipo A, de 1,5 anos para a fabricação de peças tipo B, e 1,7 anos para a fabricação de peças tipo C.

Estes resultados de *payback* são significativos e comprovam, em princípio, a viabilidade da aplicação da STA. Entretanto a equipe de engenheiros que conduziu o projeto decidiu aplicar uma análise de cenários similar à utilizada na experiência com a SEM na MBB, possibilitando uma visão econômica sobre a aplicação da metodologia quando esta se estende para parques industriais que possuem muitas prensas hidráulicas similares em funcionamento.

O custo de implementação da solução STA para apenas uma máquina situa-se em € 17.172,00 e quando se faz uma análise de resultados simples, para uma única máquina, confrontando-se este investimento com uma receita anual média (calculada pela média ponderada^(*) da economia anual apresentada na Tabela 17) de €10.331,00, fica-se com a impressão de que a empresa teria prejuízos, pois o

(*) A ponderação para o cálculo da média ponderada da economia anual levou em conta o consumo de energia anual mostrado na Tabela 17. O resultado da média ponderada, entretanto, foi muito próximo do de uma média simples.

resultado econômico seria negativo (investe-se € 17.172,00 e obtém-se ganho de € 10.331,00, com prejuízo de € 6.841,00).

Entretanto, conforme se observa pelos fundamentos dos Instrumentos para análise de viabilidade econômica e Tecnológica, apresentados no Anexo A, desta tese, a análise econômica deve considerar aspectos temporais, sendo necessário o uso de fluxos de caixa, pois a máquina receberá investimentos e continuará funcionando por um longo tempo – e não apenas por um único ano. De modo conservador, por exemplo, utilizou-se, tanto no caso da SEM quanto da STA, um horizonte de planejamento de cinco anos, embora, em muitos casos, dada a eficácia dos programas de manutenção da indústria, as máquinas hidráulicas têm duração de vários anos e até décadas.

Um outro aspecto relevante a ser considerado especificamente no caso da aplicação da STA é o fato de que são adquiridos equipamentos novos de fabricante externo para modernizar as máquinas hidráulicas existentes. No caso da SEM, apenas para contrapor, os investimentos ocorrem no software já existente, não implicando em aquisição de equipamentos adicionais de fabricantes externos. Isto significa que, aplicando-se a STA, tem-se a possibilidade de negociar descontos sobre o preço pago pelos equipamentos quando se pretende modernizar cinco, 10 ou 50 máquinas hidráulicas de um determinado parque industrial.

Os engenheiros responsáveis pela aplicação da STA consultaram o fabricante de equipamentos e obtiveram os resultados sintetizados na Tabela 18, com descontos escalonados para a aplicação da STA em números crescentes de máquinas.

Tabela 18 - Possíveis descontos a serem concedidos pelo fabricante

Tabela de Desconto					
Número de Máquinas	1	5	10	50	100
Desconto (%)	0%	5%	8%	10%	15%
Investimento	€ 17.162,00	€ 81.519,50	€ 157.890,40	€ 772.290,00	€ 1.458.770,00

Fonte: Adaptado de Voith (2017)

Pela Tabela 18 é possível ver que o fornecedor de equipamentos pode conceder até 15% de desconto no preço unitário dos equipamentos, possibilitando diferentes valores de investimentos, conforme cada cenário adotado pela equipe de analistas.

Tabela 19- Cenários, receitas e investimentos para aplicação da STA

CENÁRIO			Receita anual	Investimento
Cenário 1	1	máquina com as características analisadas	€ 10.311,30	€ 17.162,00
Cenário 2	5	máquinas similares	€ 51.556,52	€ 81.519,50
Cenário 3	10	máquinas similares	€ 103.113,04	€ 157.890,40
Cenário 4	50	máquinas similares	€ 515.565,22	€ 772.290,00
Cenário 5	100	máquinas similares	€ 1.031.130,43	€ 1.458.770,00

Fonte: o autor

A Tabela 19 ilustra os cinco cenários - também utilizados na aplicação SEM, conforme visto anteriormente nesta tese - com diferentes números de máquinas, conforme o parque industrial onde será aplicado a metodologia na versão STA. Observe-se que o valor dos investimentos não cresce linearmente, pois o fabricante pode conceder descontos para a aquisição de diferentes números de equipamentos para a aplicação da STA, conforme se vê na Tabela 18. A receita anual, entretanto, calculada pela média ponderada da Economia Anual apresentada na Tabela 17, cresce linearmente, pois é o resultado tecnológico direto da aplicação da MAAMEES nos equipamentos estudados.

Os fluxos de caixa para os cinco cenários estudados podem ser vistos na Tabela 20, onde os investimentos ocorrem no momento inicial (ano zero) e os resultados são contabilizados ao final de cada ano. Com esses valores é possível calcular os indicadores econômicos que mostram se a aplicação da STA nos diferentes cenários será viável.

Tabela 20 - Fluxos de caixa para os cenários de aplicação da STA

Cenário	Número de máquinas	Ano e valores em €					
		0	1	2	3	4	5
1	1	17.162,00	10.311,30	10.311,30	10.311,30	10.311,30	10.311,30
2	5	81.519,50	51.556,52	51.556,52	51.556,52	51.556,52	51.556,52
3	10	157.890,40	103.113,04	103.113,04	103.113,04	103.113,04	103.113,04
4	50	772.290,00	515.565,22	515.565,22	515.565,22	515.565,22	515.565,22
5	100	1.458.770,00	1.031.130,43	1.031.130,43	1.031.130,43	1.031.130,43	1.031.130,43

Fonte: o autor

Um dos primeiros indicadores calculados pela equipe de engenheiros que acompanhou o projeto STA na Alemanha foi o *payback* simples, agora considerando os vários cenários, conforme se pode ver na Tabela 21.

Tabela 21 - *Payback* simples para os diferentes cenários de aplicação da STA

Cenário	Número de máquinas	<i>Payback</i> Simples (anos)
1	1	1,66
2	5	1,58
3	10	1,53
4	50	1,50
5	100	1,41

Fonte: o autor

Os indicadores de *payback* observados se aproximam muito dos valores apresentados anteriormente, na análise agregada, sem considerar cenários, que também demonstrou viabilidade com o retorno do investimento ocorrendo aproximadamente com 1,5 anos do início da aplicação da metodologia STA.

A equipe de engenheiros, porém, calculou também os indicadores de VPL e TIR, como pode se ver na Tabela 22, completando a análise de viabilidade.

Tabela 22 - VPL e TIR para os diferentes cenários de aplicação da STA

CENÁRIO	NÚMERO DE MÁQUINAS	Valor presente líquido (€)	Taxa interna de retorno (% ao ano)
1	1	€ 25.48,10	53%
2	5	€ 132.815,04	57%
3	10	€ 270.519,55	59%
4	50	€ 1.368.895,93	60%
5	100	€ 2.819.282,84	65%

Fonte: o autor

Para o cálculo do VPL foi utilizada a taxa de “custo de oportunidade” (ou taxa de juros) vigente na Zona do Euro de 5,30% ao ano, que é o custo máximo do dinheiro na região nos anos recentes e atualmente, utilizado também pelas empresas nas análises de viabilidade conforme o Trading Economics (2017).

Este site especializado também esclarece que as taxas de juros na Europa ainda estão muito próximas de zero, porém na prática cotidiana dos negócios há que se utilizar um custo de oportunidade entre “investir” e “emprestar” o dinheiro à taxa máxima vigente, daí porque as empresas se utilizam de 5,30% ao ano como taxa de juros para cálculo de indicadores de viabilidade.

Os engenheiros responsáveis pelo projeto STA usaram esta taxa para determinar os resultados de VPL apresentados na Tabela 22, onde pode-se ver que, mesmo para

apenas uma máquina, a aplicação da STA já é viável, gerando um retorno líquido de mais de € 25 mil, num horizonte de análise de cinco anos.

O mesmo ocorre para um número de máquinas maior, nos diferentes cenários, com, por exemplo, um VPL de € 270 mil é gerado para aplicação da STA a 10 máquinas e um VPL de € 2,82 milhões para o caso de um parque industrial de 100 máquinas.

Pelo critério do VPL, tal como já ocorrera com o *payback*, a viabilidade econômica e financeira da STA já está inteiramente demonstrada, porém, com o cálculo da TIR, os engenheiros pretendem cancelar essa viabilidade, demonstrando que o retorno implícito nas operações de aplicação da STA (de 53% a 65% ao ano) é bem superior à taxa de custo de oportunidade vigente na Zona do Euro (5,30% ao ano).

6. CONCLUSÃO

A presente tese de doutorado apresenta e demonstra a aplicação experimental da MAAMEES Metodologia para Aplicação em Equipamentos Industriais Hidráulicos de Grande Porte para Melhoria da Eficiência Energética e Ganhos de Sustentabilidade, e para tanto se serve de dois procedimentos metodológicos: i) a pesquisa secundária, que possibilitou o apanhado de um volume significativo de publicações, gerando posicionamentos teóricos e conceituais que sustentam a tese; e ii) a pesquisa primária, através da realização de dois estudos empíricos, um primeiro realizado no Brasil e que se utilizou de uma máquina hidráulica pertencente à Mercedes Benz do Brasil, e um segundo realizado na Alemanha, em máquina hidráulica de cliente da Voith, através dos quais se comprovou que a metodologia tem potencial de contribuição para a melhoria da eficiência energética com ganhos de sustentabilidade em ambientes industriais, sendo também viável econômica e financeiramente a sua implementação.

A ideia da MAAMEES e de sua aplicação visando a ganhos de eficiência energética, conforme demonstrado na tese, surgiu da conjunção proativa em ambientes organizacionais onde a busca por custos menores é combinada com resultados que se coadunam com um meio ambiente em equilíbrio, onde o ser humano e os demais seres vivos são respeitados, sempre tendo por base a ideia de sustentabilidade subjacente aos conceitos inerentes à Ecoeconomia^(*).

A MAAMEES busca, deste modo, em primeiro lugar, a economia de energia, o que é compatível com a norma ISO 50001, com impactos diretos sobre os custos e sobre a produtividade, gerando o mesmo produto com demanda menor do insumo energia. Isto produz impactos sobre o meio ambiente, pois a redução do consumo energético significa, sobretudo, parcelas de energia que passam a estar disponíveis para outros fins, e, do ponto de vista da Ecoeconomia, a efetividade energética significa a prática da sustentabilidade, respeitando os recursos ambientais locais atuais em prol do benefício de gerações futuras.

A Metodologia foi concebida para uso em ambientes industriais e, para tanto, foram escolhidas as máquinas hidráulicas de grande porte como elemento de análise, tendo se desenvolvido duas vertentes da MAAMEES: a SEM e a STA.

(*) O conceito de Ecoeconomia é definido por Pereira e Simão Filho (2014, p. 15).

A SEM é aplicada aos casos em que o volume de produção e o valor agregado do resultado da produção não são de grande magnitude, o que não justifica investimentos de grande monta na modernização das máquinas hidráulicas convencionais já existentes. Pela SEM, a intervenção se dá no software do sistema de proteção aos operadores, normalmente agregado à máquina, permitindo alguns ajustes que levam à economia de energia conforme demonstrado ao longo da tese.

A STA, por seu turno, se vale de inovações tecnológicas recentes, pela qual, através de alguns equipamentos adicionais, incluindo motores de passo, servo bombas e softwares, a máquina hidráulica convencional objeto da metodologia é modernizada e, com isto, obtém-se resultados favoráveis em termos de economia energética. Isto ficou comprovado com a aplicação prática no estudo de caso.

Em ambos os casos, com a aplicação da SEM e da STA, a MAAMEES demonstrou ser uma metodologia factível, alcançando índices elevados de economia energética, com grande potencial de impacto ambiental, além de ser econômica e financeiramente viável, conforme os indicadores alcançados após os experimentos.

Após apresentar um panorama do ambiente em que surge a metodologia, a tese se ocupa dos conceitos fundamentais, como os de processo, eficiência energética, rendimento, rendimento operacional e rendimento global, os quais são apresentados e discutidos para dar sustentação lógica e conceitual para a MAAMEES.

Os fundamentos das máquinas hidráulicas e a estimativa do seu gasto energético permitiu uma análise da energia consumida calculada pelo balanço energético, pelas operações e pelo conceito de energia global, traduzida como rendimento global, o que possibilitou o desenvolvimento da MAAMEES, iniciando pelo contexto industrial e pela análise dos impactos de TI e TA sobre o ambiente industrial, seguido pela exposição da ISO 50001, norma que padroniza a gestão da eficiência energética, seguida pelas metodologias para suporte na implementação de sistemas e, finalmente, o detalhamento da estrutura, conceituação e aplicação da MAAMEES.

A MAAMEES é estruturada em três grandes partes, a análise “*ex-ante*”, a “implementação” e a análise “*ex-post*”, incluindo a escolha de uma dentre as duas possíveis soluções tecnológicas, a SEM e a STA, devidamente detalhadas na tese, identificando-se as métricas, as decisões pontuais e os indicadores relevantes para a tomada de decisão.

Na aplicação empírica da MAAMEES, onde se verifica que a metodologia se mostra viável na máquina hidráulica estudada com a aplicação da alternativa SEM em processo produtivo de baixo volume (MBB), assim como com a aplicação da alternativa STA em processo produtivo de alto volume (cliente Voith), observa-se a obtenção de ganhos de eficiência energética e o alcance de viabilidade econômica.

Do ponto de vista da sustentabilidade é importante ressaltar que ao propor e adotar iniciativas de eficiência energética, as organizações disseminam em sua cadeia de valor uma postura alinhada com os conceitos da Ecoeconomia, e que hoje aparecem nos Relatórios de Sustentabilidade, importante canal de comunicação sobre iniciativas sustentáveis e que é adotado pelas modernas empresas industriais.

A tese se conclui com a certeza de que a MAAMEES é uma metodologia que pode ser aplicada de forma independente ou concomitante com qualquer processo de conversão da indústria convencional para a indústria 4.0. A realização de novos estudos dela derivados podem contribuir ainda mais para a sempre incessante busca de eficiência energética e de ganhos de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE LETRAS (ABL). **Dicionário escolar da língua portuguesa**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008. 1312 p.

AGÊNCIA BRASIL. **Custo médio da energia para a indústria subiu para R\$ 403,8 por MWh, diz Firjan**. 4 fev. 2015. Disponível em: <www.agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-02/custo-medio-da-energia-para-industria-atinge-r-4038-por-mwh>. Acesso em: 31 jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ABESCO). **O que é eficiência energética? (EE)**. 21 fev. 2015. Disponível em: <www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>. Acesso em: 6 set. 2016.

BAUR, C.; WEE, D. Manufacturing's next act. Jun 2015. Disponível em: <www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>. Acesso em: 25 out. 2016.

BORTONI, E. C. et al. **Eficiência energética**: fundamentos e aplicações. Campinas: Elektro, 2012. 315 p.

BRASIL. Banco Central do Brasil. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/#/n/SELICTAXA>>. Acesso em fev. 2017.

_____. Ministério do Trabalho. Norma de segurança do trabalho NR-12. Disponível em: <[http://trabalho.gov.br/data/files/8A7C816A4295EFDF0142FC261E820E2C/NR-12%20\(atualizada%202013\)%20III%20-%20\(sem%2030%20meses\).pdf](http://trabalho.gov.br/data/files/8A7C816A4295EFDF0142FC261E820E2C/NR-12%20(atualizada%202013)%20III%20-%20(sem%2030%20meses).pdf)>. Acesso em: 29 mar 2015.

CAUS, S. **Les raisons des forces mouvantes**. Paris: [s.n.], 1615.

CIMM. **O que é hidráulica**. 2015. Disponível em: <www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/621-hidraulica>. Acesso em: 21 abr. 2015.

CLAUSIUS, M. R. On the moving force of heat: and the laws regarding the nature of heat itself which are deducible therefrom. **Philosophical Magazine and: Journal of Science**, London, Edinburgh And Dublin, v. 2, n. 4, p.1-20, jul. 1851. Semestral. Disponível em: <https://ia600704.us.archive.org/1/items/cbarchive_109305_onthe_movingforceofheatandthela9999/onthe_movingforceofheatandthela9999.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO (CELEP). **Eficiência energética**. 2016. Disponível em: <<http://servicos.celpe.com.br/a-celpe/Paginas/Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica/Efici%C3%AAncia-Energ%C3%A9tica.aspx>>. Acesso em: 6 set. 2016.

ECKHARDT, M.; RIBEIRO, L.F.M.; SACKSER, G.; DUARTE, L.C.S.; FERREIRA, T.A.; BENINI, L. Proposta de metodologia para levantamento de riscos ergonômicos em prensas mecânicas excêntricas. In: SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENTAL WORLD CONGRESS, 2009. **Proceedings**... Mongaguá: [s.i.], 2009.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. São Paulo: Harbra, 2003.

GOLDEMBERG, J.; PRADO, L. T. S. **O declínio dos componentes setoriais da intensidade energética mundial**. São Paulo: USP/IEE, 2014.

GORE, A. **Our choice**: how we can solve the climate crisis. New York: Bloomsbury, 2009.

HAZZAN, S.; POMPEO, J. N. **Matemática financeira**. São Paulo: Atlas, 2004.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

MARTINS, G. M. **Eficientização, gestão e diagnósticos da energia elétrica**. Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 112 slides, P&B, 25x20. Disponível em: <www.ufsm.br/desp/geomar/esp1041/Eficiencia.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

MORTAIO, L. A., **Metodologia para controle dinâmico híbrido em prensas mecânicas**. 2013. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2013.

MOTION TECHNOLOGY (U.S.A.). Schneider Electric Motion USA. **Electric motors**: Marlborough: Machinedesign.com, 2012. 8 p. Disponível em: <motion.schneider-electric.com/technology-blog/electric-motors-whitepaper/>. Acesso em: 14 set. 2015.

OEHLER, G. **Hydraulic presses**. Madison: Crafts & Hobbies, 1968.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2003.

OLIVEIRA, L. D.; MORS, P. M. **Mecânica dos fluidos**: uma abordagem histórica. Porto Alegre: Instituto de Física Ufrgs, 2009. 101 p. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/tapf/v20n3_oliveira_mors.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2015.

PARRISH, B. D. **Sustainability entrepreneurship: design principles, practices, and paradigm**. 2008. Tese (Doutorado) - University of Leeds, Leeds: University of Leeds, 2008a.

_____. Sustainability-Driven Entrepreneurship: a literature review. **SRI Working Paper** n. 9, Leeds, UK: Sustainability Research Institute, 2008b.

PEREIRA, S. L. **Ecoeconomia tecnológica cooperativa: uma proposta conceitual - ciência e tecnologia da automação como ferramentas de inclusão social e de suporte ao desenvolvimento sustentável**. 2009. Tese (Livre-Docente) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

_____; MARQUES, F. M. R. **Gás natural e transição para uma economia de baixo carbono**. São Paulo: Synergia, 2015.

_____; SIMÃO FILHO, A. **A empresa ética em ambiente econoeconômico: a contribuição da empresa e da tecnologia da automação para um desenvolvimento sustentável inclusivo.** São Paulo: Quatier Latin, 2014.

PRADO FILHO, H. R. **Gestão por processos.** 5 mai. 2010. Disponível em: <<https://qualidadeonline.wordpress.com/2010/05/05/gestao-por-processos/>>. Acesso em: 6 set. 2016.

SCATOLIN, A. C. **Aplicação da metodologia seis sigma na redução de perdas de um processo de manufatura.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SCHULER, A. G. **Bloco de válvulas de uma máquina hidráulica.** 2015. Disponível em: <www.rch.com.br/img/fgrande/foto5.jpg>. Acesso em: 10 mar. 2015.

_____. **Energy optimization for press systems.** Berlin: Powersave, 2014.

_____. **Metal forming handbook.** Berlin: Springer, 1998.

SIEMENS. 2015. Disponível em <www.industry.siemens.com>. Acesso em 17 mar. 2015.

SILVA, E. B. **Metodologia para planejamento da convergência da tecnologia da informação (TI) & tecnologia da automação (TA) em processos industriais.** 2013. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SLACK, N.; CHAMBERS; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

THOMSON, W. Kinetic theory of the dissipation of energy. **Nature**, 9 apr. 1874, p. 441-444. Disponível em: <http://zapatopi.net/kelvin/papers/kinetic_theory.html>. Acesso em: 8 set. 2015.

TRADING ECONOMICS. **Euro área interest rate.** Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/euro-area/interest-rate>>. Acesso em 5 mar. 2017.

VASCONCELLOS, M. A. S. et al. **Economia brasileira contemporânea.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

VOITH TURBO H + L HYDRAULIC GMBH & CO. KG. **PSH Press Drive Servo Hybrid:** servo pump drive system for hydraulic presses. Rutesheim, 2017.

WAGANOFF, N. P. **Prensas hidráulicas.** Buenos Aires: Alsin, 1961. 351 p.

WEG (BRASIL). **Cartilha WEG:** uso eficiente da energia elétrica. Jaraguá do Sul: Weg, 2010. 24 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2015.

ZAMZAM, M. **Case study:** planning and implementing energy efficiency improvements, ADCO. In: 10th ENGINEERING EXCELLENCE FORUM 'ENERGY EFFICIENCY - MANAGERIAL AND TECHNICAL CHALLENGES', 10., 2014, Abu Dhabi. **Proceedings...** Abu Dhabi.: [s.i.], 2014. Disponível em: <<https://www.energyinst.org/documents/2943>>. Acesso em: 20 ago 2015.

ZHU, P. et al. **A novel sensitivity analysis method in structural performance of hydraulic press.** School of Mechanical Engineering. Tianjin: Tianjin University, 2014.

ZÜGE, C. T. Y. **Alinhamento do planejamento estratégico com o plano diretor da automação industrial em pró do desenvolvimento sustentável.** 2014. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

_____; PEREIRA, S.L.; DIAS, E.M. Integration of information technology and automation: Facilitators and Barriers, GAESI - Group for Electric Automation of Industrial Systems - Department of Electrical Energy and Automation Engineering of São Paulo University São Paulo University (USP) - Polytechnic School WSEAS Transactions on Systems and Control. v. 5, n. 5, mai. 2010.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ABBOTT, A. **On theory and method**. Chicago: University of Chicago Press, 2012.

AGUSTIADY, T.; BADIRU, A.B. **Sustainability**: utilizing lean six sigma techniques. New York: Editorial Taylor Francis, 2012.

ALCOA. **Latest news**. 2015. Disponível em: <www.alcoa.com/global/en/news/newsdetail.asp?pageID=20120213005935en> Acesso em: 21 fev. 2015.

ANFAVEA. Relatórios estatísticos. 2017. Disponível em: <www.anfavea.com.br/estatisticas.html>. Acesso em: 15 mar. 2017.

ANGELL, L. C.; KLASSEN, R.D. Integrating environmental issues into the mainstream: an agenda for research in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 17, n. 5, p. 575-598, 1999.

BANSAL, R. K. **Fluid mechanics and hydraulic machines**. 9. ed. New Delhi: Laxmi Publications, 2014. 1102 p.

BARBIERI, J. C.; CAJAZEIRA, J. E. R. **Responsabilidade social empresarial e empresa sustentável**: da teoria à prática. São Paulo: Saraiva, 2013.

BAUSER, M.; SAUER, G.; SIEGERT, K. **Extrusion**. 2. ed. Dusseldorf: Aluminium Verlag - Asm, 2006.

BEZERRA, M. C. L.; BURSZTYN, M. **Ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Consórcio CDS/ UNB/ Abipti, 2000.

BOEHE, D. M.; ZAWISLAK, P.A. Influências ambientais e inovação de produtos: estudo de casos em subsidiárias de multinacionais no Brasil. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 11, n. 1, jan./mar. 2007.

BRAGA, M. B. O movimento antiglobalização: causas e possíveis consequências. **Informações FIPE**, n. 241, São Paulo: FEA/USP, 2000.

BRUNDTLAND, G. H.; COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Relatório Brundtland**: nosso futuro comum. Rio de Janeiro: FGV, 2009.

CARDOSO, A. A. **Simulação numérica de componentes mecânicos**. São Paulo: Gac Soluções, 2011. 44 slides, color. Disponível em: <www.gacsolucoes.com.br/pubs/PORTFOLIO_GAC.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2015.

CARDOSO, F. H. **As idéias e seu lugar**: ensaios sobre as teorias do desenvolvimento. Petropolis: Vozes, 1980.

CARNOY, M. **The new global economy in the information age**: reflections on our changing world. Philadelphia: Pennsylvania State University Press, 1993.

CAVALCANTI, C. (Org.). **Desenvolvimento e natureza**: estudos para uma sociedade sustentável. São Paulo: Cortez, 2003.

CLIFFORD, A.; DIXON, S. E. A. Green-Works: a model for combining social and ecological entrepreneurship. In: MAIR, J.; ROBINSON, J.; HOCKERTS, K. (Eds.). **Social entrepreneurship**. New York: Palgrave MacMillan, 2006.

CLUBE DE ROMA. **Os limites do crescimento**. 1968. 23. ed. New York: Nações Unidas, 2012.

COHEN, B.; WINN, M. I. Market imperfections, opportunity and sustainable entrepreneurship. **Journal of Business Venturing**, v. 22, n.1, p. 29-49, 2007.

COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. **Administrative Science Quarterly**, v. 35, n. 31, 2010.

_____; _____. Innovation and learning: the two faces of R&D. **Economic Journal**, v. 199, n. 497, p. 569, 2009.

COMMON, M. S. **Sustainability and policy**: limits to economics. New York: Cambridge University Press, 1995.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria automobilística e sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002175420378115i.pdf>. Acesso em: 12 out. 2016.

COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural capital and sustainable development. **Conservation Biology**, v. 6, n. 1, p. 37-46, 1992.

CRAMER, J.; ZEGVELD, W. C. L. **The role of technology in environmental management**. London: W&Sons, 2011.

DAIMLER, B. **Sustainability report 2013**. 2014. Disponível em: <<http://sustainability.daimler.com>>. Acesso em: 12 out. 2016.

DEAN, T. J.; MCMULLEN, J. S. toward a theory of sustainable entrepreneurship: reducing environmental degradation through entrepreneurial action. **Journal of Business Venturing**, v. 22, n. 1, p. 50-76, 2007.

DECHEZLEPRÊTRE, A.; SATO, M. **The impacts of environmental regulations on competitiveness**. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, 2014.

DIAS, R. **Gestão ambiental**: responsabilidade social e sustentabilidade. São Paulo: Atlas, 2006.

DICIONÁRIO ESCOLAR DA LÍNGUA PORTUGUESA. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2012.

EARTH CONDOMINIUM. 2015. Disponível em <www.earth-condominium.org/pt/envolva-se/declaracao-de-gaia/>. Acesso em: 22 jan. 2015.

ECKERT, P. R. **Método de elementos finitos introdução**. Porto Alegre: Ufrgs, 2012. 24 slides, color. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lmeae/arquivos_disciplinas/eng04407/MEF.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2015.

ECO, U. **Como se faz uma tese**. Lisboa: Editorial Presença, 1998.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). **Pesquisa setorial: a cadeia de valor do aço**. São Paulo: FIESP, 2013.

_____; CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (CIESP) **A indústria brasileira no caminho da sustentabilidade**. São Paulo: CIESP, 2014.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). **Custo médio da energia para indústria**. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-02/>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

FERREIRA, L. C. **A questão ambiental: sustentabilidade e políticas públicas no Brasil**. São Paulo: Boitempo Editorial, 1998.

FGV BIBLIOTECA. Disponível em: <www.fgv.br/biblioteca.html>. Acesso em: 17 dez. 2014.

FINE, C. H. **Mercados em evolução contínua**. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

FRANCE METALLURGIE. **China has started the building of an 80,000-ton press forge (US)**. 2 feb. 2012. Disponível em: <<http://www.france-metallurgie.com/china-has-started-the-building-of-an-80000-ton-press-forge-us/>>. Acesso em: 21 fev. 2015.

GIBBS, D. Sustainability entrepreneurs, ecopreneurs and the development of a sustainable economy. **Greener Management International**, v. 55, p. 63-78, 2009.

GOLDEMBERG, J. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, v. 12, n. 33, p. 7-15, 1998.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.

_____; et al. **A nova economia internacional: uma perspectiva brasileira**. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

GORE, A. **Our choice: how we can solve the climate crisis**. New York: Bloomsbury, 2009.

_____. **The future: six drivers of global change**. San Francisco: Google, 2013.

GRAUWE, P. **Dimensions of competitiveness** Boston: MIT Press, 2010.

HABERLER, G. Los terminos de intercambio y el desarrollo económico. In: ELLIS, H.S. **El desarrollo económico y América Latina**. Cidade do México: Fondo de Cultura, 1957.

HARDI, P.; ZDAN, T. **Avaliando desenvolvimento sustentável**. Tradução de Claudia Collares. Winnipeg: Zinpress, 2007.

HECKSCHER, E. The effects of foreign trade on the distribution of income. **Readings in The Theory of International Trade**, New York: American Economic Association, 1949.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (IISD). **Em busca do desenvolvimento sustentável do ponto de vista empresarial**. São Paulo: IICD, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Standards**. Disponível em: <www.iso.org/iso/home/standards.htm>. Acesso em: 10 fev. 2015.

JONAS, H. **Princípio: responsabilidade**. New York: Nações Unidas, 1979.

KASSAI, S. **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis**. 2002. Tese (Doutorado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

KRUGMAN, P. R.; OBSTFELD, M. **Economia internacional: teoria e política**. 7. ed. São Paulo: Makron Books/Pearson, 2005.

LACOMBE, F. J.; HEILBORN, G. L. J. **Administração: princípios e tendências**. São Paulo: Saraiva, 2003.

LAPINSKIENĖ, G. **Analysis of the relationship between the sustainable development and competitiveness**. Vilnius: Mykolos, 2014.

MACEDO, M. A. S; BENGIO, M. C Avaliação da eficiência organizacional através da análise envoltória de dados. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CUSTOS, 8., **Anais...** Punta del Leste, 2003.

MASTER IN AUTOMATION AND IT. **Why automation & IT?**. 2015. Disponível em: <www.master-ait.de/content/e1429/e980/index_eng.html>. Acesso em: 12 jan. 2015.

MAXWELL, J. C. **Theory of heat**. 3. ed. London: Longman~ Gree~ And En, 1872. 325 p. Disponível em: <http://www3.nd.edu/~powers/ame.20231/maxwell1872.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

MERCEDES BENZ DO BRASIL (MMB). **Relatório de Sustentabilidade 2010-2011**. São Paulo: MBB, 2013.

_____. **Relatório de sustentabilidade 2012-2013**. São Paulo: MBB, 2017. Disponível em: <<http://www.sustentabilidade.mercedes-benz.com.br/2013/rao.asp>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

_____. **Relatório de Sustentabilidade 2014-2015**. São Paulo: MBB, 2016. Disponível em: <<http://relatoweb.com.br/mercedes/2015/pt/downloads.html>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

METAL FORMING FACTS. **Advantages of hydraulic presses**. Philadelphia: The Lubrizol Corporation, 2013.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**: norma regulamentadora no. 12. Brasília, 2010. 39 p.

MOURA, L. A. **Qualidade e gestão ambiental**: sugestões para implantação das normas ISO 14000 nas empresas. 6. ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2010.

MYRDAL, G. **Teoria econômica e regiões subdesenvolvidas**. Rio de Janeiro: Saga, 1965.

NURKSE, R. **Problemas de formación de capital**. Cidade do México: Fundo de Cultura, 1955.

O'NEILL, G. D., JR; HERSHAUER, J. C.; GOLDEN, J. S. The cultural context of sustainability entrepreneurship. **Greener Management International**, v. 55, p. 33-46, 2009.

OHLIN, B. The gain from International trade. **Interregional and International trade**. Cambridge: Harvard Press, 1951.

OLIVEIRA, C. A. **Inovação da tecnologia, do produto e do processo**. 2. ed. São Paulo: IDG, 2004.

ONKEN, M. **What was the first machine that was invented?** Saint Louis: Washington University, 1997. (868164007.Sh). Disponível em: <<http://www.madsci.org/posts/archives/1997-08/869839593.Sh.r.html>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

PARRISH, B. D. Designing the sustainable enterprise. **Futures**, v. 39, n. 7, p. 846-860, Leeds, U.K.: 2007.

_____; TILLEY, F. Sustainability entrepreneurship: charting a field in emergence. In: SCHAPER, M. (Ed.), **Making ecopreneurs**: developing sustainable entrepreneurship. Aldershot, UK: Gower, 2009.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomia**. São Paulo: Makron, 2009.

PRAHALAD, C. K.; HAMEL, G. The core competence of the corporation. **Harvard Business Review**, p. 79-91, may./jun. 1990.

PREBISCH, R. **El desarrollo económico de América latina y algunos de sus principales problemas**. Nova York: CEPAL/ONU, 1950.

_____. **Estudio económico de América Latina**. Nova York: CEPAL/ONU, 1951.

REGIS, R. L. **Eficiência energética em processos de bombeamento d'água**. 2010. 90 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010. Disponível em: <<http://www.labefea.eng.ufba.br/sistema/upload/filemo/1275056162.PDF>>. Acesso em: 14 set. 2015.

ROSER, C. **Faster, Better, Cheaper In The History Of Manufacturing**: From The Stone Age To Lean Manufacturing And Beyond. Boca Raton: Productivity Press, 2014.

SACHS, I. **Estratégias de transição para do século XXI**: desenvolvimento e meio ambiente. São Paulo: Studio Nobel/Fundap, 1993.

SANGERS, S. **Saving energy in industrial equipments**. Boston: MIT Press, 2014.

SCHLANGE, L. E. Stakeholder Identification in Sustainability Entrepreneurship: the role of managerial and organizational cognition. **Greener Management International**, v. 55, p. 13-32, 2009.

_____. What drives sustainable entrepreneurs? **Indian Journal of Economics and Business**. (Special Issue on ABEAI Conference Kona), p. 35-45, 2007.

SIEMENS. **Servo Pumps**: the efficient solution for state-of-the-art hydraulic systems. Artigo no. E20001-A330-P670-X-7600 e E20001-A1190-P620-X-7600. Disponível em: <<http://www.siemens.com/servo-pump>>. Acesso em 24 out. 2017.

SLACK, N. **Vantagem competitiva em manufatura**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SMITH, A. **A riqueza das nações**. São Paulo: Abril Cultural, 1992.

SORTINO, G. F. F. **Adequação de cadeia de suprimentos: um estudo na indústria automotiva brasileira**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Fundação GEtúlio Vargas, São Paulo, 2004.

ST. JOHN, C. H.; CANNON, A. R.; POUDER, R. W. Change drivers in the new millennium: implications for manufacturing strategy research. **Journal of Operations Management**. v. 19, n. 2, p. 143-160, 2001.

STALK, G. JR. Time: the next source of competitive advantage. **Harvard Business Review**, p.60-67, jul./aug. 1988.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Dedication program**: national historic mechanical engineering Landmark the Wyman-Gordon 50,000-ton forging press. 20 oct. 1983. Disponível em: <www.asme.org/wwwasme.org/media/ResourceFiles/AboutASME/Who%20We%20Are/Engineering%20History/Landmarks/89-wyman-gordon-50000-ton-hydraulic-forging-press.pdf>. Acesso em 21 fev. 2015.

THE LIBRARY OF MANUFACTURING. 2015. Disponível em: <<http://www.thelibraryofmanufacturing.com/presses.html>>. Acesso em: 19 fev. 2015.

TILLEY, F.; PARRISH, B. D. Introduction to sustainability entrepreneurship research. **Greener Management International**, v. 55, p. 5-12, 2009.

_____; YOUNG, W. Sustainability entrepreneurs: could they be the true wealth generators of the future? **Greener Management International**, v. 55, p. 79-92, 2009.

TORRES, N. A. **Competitividade empresarial com a tecnologia da informação**. São Paulo: Makron, 1994.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Método de elementos finitos**: São Paulo: USP, 2011. 38 slides, color. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/pmt2404/Elementos_finitos_final.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2015.

UNIÃO INTERNACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA. **Estratégia global para a conservação**. New York: Nações Unidas, 1980.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP). **Sustainable and responsible business**. 2015. Disponível em: <www.unep.org/resourceefficiency/Business/SustainableandResponsibleBusiness/CorporateSustainabilityReporting/tabid/78907/Default.aspx>. Acesso em 12 jan. 2015.

VALLERO, D.; BRASIER, C. **Sustainable design**: the science of sustainability and green engineering. Hoboken: John Wiley and Sons, 2008.

VENKATRAMAN, N. Beyond outsourcing: managing IT resources as a value center. **Sloan Management Review**, p. 51-64, 1997.

_____. IT- enabled business transformation: from automation to business scope redefinition. **Sloan Management Review**, p. 73-87, 1994.

WEIGMANN, P. R. **Metodologia para eficiência energética, otimização do consumo e combate ao desperdício de energia através da inserção da cultura empreendedora e fontes de inovação tecnológica** 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

WERNERFELT, B. "A Resource-Based View of the Firm". In: **Strategic Management Journal**, v.1, n. 5, p. 171-180, 1984.

WHEELER, M.; MENKEL-MEADOW, C. **What's fair**: ethics for negotiators. San Francisco: Jossey-Bass, 2004.

WORLD ENGINEERING PARTNERSHIP FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WEPSD). **Standard for sustainability**. 2015. Disponível em: <[http://www.wepd.org-\(est.-1992\)-\(WEPSD\).html.2015](http://www.wepd.org-(est.-1992)-(WEPSD).html.2015)>. Acesso em: 12 out. 2016.

YOUNG, W.; TILLEY, F. can businesses move beyond efficiency? The shift toward effectiveness and equity in the corporate sustainability debate **Business Strategy and the Environment**, v.15, n. 6, p. 402-415, 2006.

ZIPKIN, P. The Limits of Mass Customization. **Sloan Management Review**, v. 42, n. 3. 2001.

ZUBOFF, S. **In the age of the smart machine**: the future of work and power. 5.ed. New York: Basic, 2008.

ANEXO A

Instrumentos para Análise de Viabilidade Econômica e Tecnológica

Baseado em Sortino (2004), sabe-se que a análise de viabilidade econômica deve ser feita para estimar os custos, as despesas, os investimentos e as receitas ou benefícios proporcionados pela implementação do projeto de busca melhoria de eficiência energética.

Antes da aplicação dos modelos econômico-financeiros, é importante que seja possível estabelecer um fluxo de caixa, com entradas e saídas de investimentos, receitas, ganhos de eficiência e despesas, com os valores devidamente datados, possibilitando a aplicação dos métodos adiante apresentados para a realização das análises.

Para um exemplo de aplicação dessa análise de viabilidade, vide o capítulo 5 desta tese.

1. Período de *Payback*

Fundamentados em Gitman (2003) e em Hazzan e Pompeo (2004), pode-se ver que o Período de *payback* mede o período de retorno do investimento para as mãos do investidor (daí seu nome original *payback period*), com base na geração de caixa, medindo em quanto tempo o dinheiro investido terá seu retorno. Quanto menos tempo levar para se ter o retorno do investimento, menor será o risco do empreendimento e, conseqüentemente, melhor será para os empreendedores.

Na comparação entre dois projetos, aquele que tiver maior fluxo de caixa inicial certamente será o preferido, pois possibilitará encontrar mais rápido o período efetivo de recuperação do investimento (GITMAN, 2003).

A expressão para o cálculo do *payback* pode ser dada por:

$$\text{Período de Retorno} = \frac{\text{Desembolso Total}}{\text{Fluxo de Caixa Líquido Médio}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em outras palavras, calcula-se o *payback* verificando-se o tempo exato em que o capital investido leva para retornar às mãos do investidor, sem considerar o custo de oportunidade deste capital. O método, aliás, é muito criticado nos meios financeiros exatamente por não levar em conta o custo do dinheiro ou o valor do dinheiro no tempo. O fato, contudo, é que o *payback period* é um indicador muito simples e funcional e, por isto mesmo, mais conhecido e utilizado na prática que os demais métodos (HAZZAN; POMPEO, 2004).

Suas vantagens são sua simplicidade e o cálculo imediato, obtendo-se o resultado de que “quanto menor o *payback*, maior a liquidez e segurança do projeto”. Como desvantagens podem se listar (1) que não considera (como já dito antes) o valor ou custo do dinheiro no tempo; (2) ignora os fluxos previstos após o período do *payback*; (3) não estabelece qual o valor mínimo do *payback* exigido para aceitação do projeto (a não ser de modo “ad hoc”); e (4) ignora os problemas de escala do investimento.

Em relação ao fato do método não apresentar considerações ao custo dos recursos (custo de capital ou de oportunidade ou ainda taxa de atratividade ou de desconto), na prática, para sua correção, há a possibilidade de se adaptar o método, introduzindo a atualização do fluxo de caixa por um fator de desconto. Neste caso, a comparação dos investimentos se faz com um fluxo de caixa descontado, à data zero do empreendimento, possibilitando uma análise mais realista.

Quando se efetiva esta correção do período de *payback* utilizando uma taxa de custo de oportunidade, temos, então, uma distinção entre dois modelos: o Pay Back Clássico (tradicional, sem emprego de taxa de desconto) e o *payback* descontado. Ambos são empregados nas análises de viabilidade econômica e financeira de projetos.

2. Valor Presente Líquido

Denomina-se, por sua vez, VPL do fluxo de caixa de um projeto de investimento, à soma algébrica de todos os recebimentos e pagamentos atualizados com base em uma taxa de descontos que corresponda ao custo de oportunidade do capital investido. Sendo “i” a taxa de descapitalização ou de atratividade de um projeto, “n” a vida útil do investimento, e, FCLj o valor do fluxo de caixa do instante j, temos que:

$$VPL = \frac{FCL_0}{(1+i)^0} + \frac{FCL_1}{(1+i)^1} + \frac{FCL_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FCL_n}{(1+i)^n} \quad (\text{Equação 2})$$

Ou ainda

$$VPL = \sum_{j=1}^n (FCL_j) (1+i)^{-j} \quad (\text{Equação 3})$$

O VPL é também entendido como uma função matemática (polinomial) da taxa de juros utilizada para descontar o fluxo de caixa. A título de ilustração, ajudando a compreender a aplicação prática do método, admitamos um investimento no valor de \$ 100 que gera nos três anos subsequentes, respectivamente, recebimentos de \$ 30, \$ 38, e \$ 55. O VPL seria dado pela seguinte função polinomial:

$$VPL = -100 + \frac{30}{(1+i)^1} + \frac{38}{(1+i)^2} + \frac{55}{(1+i)^3} \quad (\text{Equação 4})$$

A Tabela abaixo mostra o VPL do fluxo de caixa acima ilustrado, adotando-se um conjunto de possíveis valores para a taxa de juros.

Diferentes níveis de VPL e taxa de juros	
Taxa de juros	\$ VPL
0%	23,0
5%	10,0
10%	(0,0)
15%	(7,8)
20%	(14,0)

Fonte: elaborado pelo autor.

Do ponto de vista gráfico, a função resultante é ilustrada na Figura a seguir, na qual, quando a função VPL intercepta o eixo das ordenadas, o valor do VPL é nulo. Neste ponto, dado o exemplo escolhido, a taxa de desconto é 10% e é denominada TIR (método que será explicado em seguida).

Gráfico do VPL

Fonte: o autor.

Quando a taxa é zero, o VPL corresponde à simples soma algébrica dos valores do fluxo de caixa (\$ 23). Em um projeto de investimentos, para que o capital investido seja integralmente recuperado com qualquer taxa de rentabilidade positiva, é necessário que tenha VPL positivo.

No exemplo escolhido, para taxas de juros inferiores a 10% ao ano o VPL do fluxo de caixa estudado é positivo. O VPL é nulo quando a taxa é 10% a.a., e torna-se crescentemente negativo à medida que a taxa aumenta a partir de 10% ao ano.

A taxa mínima de rentabilidade a qual o investidor pode aplicar seus recursos é denominada taxa de atratividade, ou custo de oportunidade do capital próprio. Se, no exemplo dado, o custo do investidor for 10% ao ano, ou seja, o investidor tenha a possibilidade de aplicar seus recursos a esta taxa em investimentos alternativos ao projeto, em um mesmo nível de risco, o investimento no projeto não será recomendável porque o VPL resultante é nulo. Apenas para taxas de atratividade menores que 10% em outras alternativas seria recomendável ao empreendedor realizar o projeto.

O VPL é considerado, segundo a farta literatura econômica e financeira disponível, com destaque para Gitman (2003) e Hazzan e Pompeo (2004), um dos métodos de maior objetividade, pois trata de recursos efetivamente aplicados no projeto e devidamente datados. Também, dada uma taxa de atratividade realista, passível de ser determinada a partir de análises econômicas prospectivas, é um dos métodos de maior efetividade prática, possibilitando, com grande probabilidade, ver realizado aquilo que foi planejado.

3. Taxa Interna de Retorno

A TIR de um investimento, por seu turno, é um método muito próximo do VPL e é a taxa de desconto que anula o VPL do fluxo de caixa associado a esse investimento. Pode-se explicá-la assim:

FCL_j = Fluxo de caixa líquido esperado do investimento, referente no período j .

$r = TIR$ = Taxa de desconto que anula o valor presente do fluxo de caixa.

VPL = Valor presente líquido do fluxo de caixa.

$$VPL = \sum_{j=1}^n (FCL_j) (1+r)^{-j} = 0 \quad \text{Ou:} \quad (\text{Equação 5})$$

$$0 = \frac{FCL_0}{(1+r)^0} + \frac{FCL_1}{(1+r)^1} + \frac{FCL_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FCL_n}{(1+r)^n} \quad (\text{Equação 6})$$

Utilizando o mesmo projeto de investimentos que serviu para o exemplo do VPL, anteriormente, a TIR “r” seria assim determinada:

$$0 = - \frac{(\$100)}{(1+r)^0} + \frac{\$30}{(1+r)^1} + \frac{\$38}{(1+r)^2} + \frac{\$55}{(1+r)^3} \quad (\text{Equação 7})$$

O valor de r somente pode ser obtido na prática mediante um processo de tentativas e erros. O cálculo requer o procedimento inicial de escolher uma taxa de juros r , descontar os valores do fluxo de caixa a essa taxa para o instante zero e avaliar o VPL resultante. Se for positivo, o passo seguinte é utilizar uma taxa maior do que a inicialmente escolhida; se negativo, esta deve ser reduzida. A experimentação sucessiva conduzirá à taxa de desconto que anulará o VPL, a qual será a TIR do fluxo de caixa. As calculadoras financeiras atuais e os programas de computador (Excel e outros), contudo, executam essa rotina de modo imediato e facilitado, dispensando o trabalho de tentativa e erro ou a “interpolação linear” (suposição de que a função VPL é linear, facilitando a determinação da TIR), como normalmente se faz “à mão”.

A taxa interna de retorno apresenta algumas características que é interessante destacar. A taxa é chamada “interna” porque depende exclusivamente das características do fluxo de caixa. Não há necessidade de qualquer tipo de premissa externa adicional que dependa de preferências ou características do investidor - é um valor intrínseco ao fluxo. À exceção de fluxos bastante simples, a taxa somente pode ser calculada por tentativa e erro, através de aproximações sucessivas (trabalho realizado, de modo facilitado e instantâneo, pelo computador ou pela calculadora financeira programada).

Um fluxo de caixa pode, eventualmente, apresentar múltiplas taxas internas de retorno, dependendo de suas características matemáticas. Projetos convencionais de investimento - quando há uma única mudança de sinal - produzem uma única TIR. Esse fato é relevante porque, para que a TIR tenha sentido financeiro é necessário que o fluxo de caixa produza uma única TIR.

Como indicador de mérito do projeto, o método da TIR, financeiramente, é considerado inferior ao método do VPL, já que, entre dois projetos mutuamente exclusivos, o que apresentar TIR menor poderá ser preferível, desde que tenha um maior VPL (outra forma de explicar o fato é dizer que a TIR nada informa sobre a escala da alternativa considerada: havendo dois projetos mutuamente exclusivos, o primeiro com VPL de \$10 mil e TIR de 20%, pode ser preferível à outro, cuja TIR seja 40%, e VPL de \$1 mil).

Para avaliar o mérito de uma alternativa de investimentos, o VPL, calculado descontando-se o fluxo de caixa ao custo de capital, parece ser o preferido dentre os profissionais e autores de finanças (GITMAN, 2003 e HAZZAN; POMPEO, 2004).

Alternativamente, no método da TIR esta é comparada ao custo de capital, sendo rejeitada se for inferior à taxa mínima de atratividade escolhida (geralmente o custo de capital do empreendedor – que pode ser determinado intrinsecamente a seus empreendimentos atuais ou tomada no mercado, como esclarecido adiante).

Para efeito prático, contudo, sugere-se sejam observadas as seguintes regras. Se o projeto for realizado exclusivamente com recursos próprios, o custo de capital é a taxa de juros máxima à qual podem ser aplicados esses mesmos recursos pelo investidor, admitindo que a alternativa contenha igual risco.

Se o investimento for realizado exclusivamente com empréstimos, o custo de capital é a taxa de tomar emprestados os recursos.

Se o projeto for efetuado utilizando capital próprio e endividamento com juros remuneratórios explícitos, o custo de capital deve ser calculado como sendo a média ponderada do custo de oportunidade do capital próprio e das taxas de juros dos empréstimos e financiamentos, determinando-se o que se conhece por Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC) ou *Weight Average Cost of Capital* (WACC).

4. WACC

Esquemáticamente, o WACC (ou CMPC) pode ser assim explicado:

$$\text{CMPC} = k.[\text{PL}/(\text{PL}+\text{E})] + j.[\text{E}/(\text{PL}+\text{E})] \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

CMPC = Custo médio ponderado de capital.

k = Custo de oportunidade do capital próprio.

PL = Capital próprio investido.

E = Empréstimos ou financiamento.

j = Taxa de juros do empréstimo ou financiamento.

O conjunto (PL + E) representa o total de capital empregado no empreendimento (composto de capital próprio – PL – e de capital de terceiros – E). Na literatura, diferentes rubricas são utilizadas para denominar estas espécies de capital.

Se for introduzida a questão tributária na análise, a expressão do WACC ou CMPC será assim configurada:

$$\text{CPMC} = k.[\text{PL}/(\text{PL}+\text{E})] + j.(1-t)[\text{E}/(\text{PL}+\text{E})] \quad (\text{Equação 9})$$

Onde t representa o montante de tributos diretos incidentes sobre os lucros, significando, na prática, que há um ganho derivado da tributação pelo fato da empresa “pagar juros” a terceiros por estar alavancada.

O método traz implícita uma dificuldade adicional que é a determinação das variáveis t (custo tributário), k (custo do capital próprio) e j (custo do capital de terceiros).

A determinação de “ t ” é absolutamente empírica e depende do ambiente jurídico, econômico e societário onde se encontra o empreendimento.

O custo do capital de terceiros (j) pode ser obtido pela análise do custo médio da tomada de recursos de terceiros.

A maior dificuldade reside na determinação do custo de capital próprio (k), pois este cálculo envolve a determinação de outras variáveis.

Podem-se utilizar dois modelos:

O Modelo de Gordon, expresso por

$$K = (\text{DIV}/P) + g \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

K : custo do capital próprio

DIV : dividendos do próximo período

P : preço da ação da empresa no mercado (ou valor da empresa no mercado)

g : taxa de crescimento prospectivo

Ou o Modelo CAPM (Capital Assets Pricing Model), expresso por:

$$K = R_f + \beta(R_m - R_f) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

K : custo do capital próprio

R_f : retorno livre de risco

β : coeficiente “beta” da empresa

$(R_m - R_f)$: prêmio pelo risco de mercado

A determinação das variáveis integrantes dos dois modelos é sempre um desafio nas análises empíricas, porém, determinadas as variáveis k (utilizando ora o Modelo de Gordon ora o Modelo CAPM), j e t , sob determinadas hipóteses, é possível estabelecer o WACC (custo médio ponderado de capital) do projeto, obtendo-se, daí a taxa de atratividade ou o custo de oportunidade para que os fluxos de caixa prospectivos do projeto (em um determinado horizonte de planejamento) possam ser descontados.

Este procedimento ou método de avaliação de projetos ou empreendimentos é também denominado DCF (*Discounted Cash Flow* ou Fluxo de Caixa Descontado), sendo através dele que se calculam, conforme demonstrado acima, os indicadores de *payback* descontado, VPL, TIR e ROI.

5. ROI

O ROI consiste, de maneira singela, em dividir o VPL pelo valor presente dos investimentos realizados, obtendo-se um indicador de resultados subordinado à taxa de atratividade escolhida. Diferentes taxas de atratividade, levarão a diferentes valores de VPL, a diferentes períodos de *payback* e a diferentes indicadores de ROI, porém a uma única TIR (posto que esta é intrínseca ao fluxo de caixa, razão pela qual, quando há muita certeza sobre a efetividade do fluxo de caixa, ao longo do horizonte de planejamento, o método da TIR é recorrido com mais frequência).

Na análise financeira de projetos é também recomendado o uso do conceito de Ponto de Equilíbrio (denominado *Break-Even-Point* [BEP], em inglês).

6. Análise do Ponto de Equilíbrio

O BEP tem natureza contábil e, para sua determinação, é necessário conhecer a “função de receita” e a “função de custos” específicas do projeto.

A função de Receita, segundo a teoria financeira, tem a seguinte expressão:

$$\text{Receita} = \text{Preço} * Q \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

Q é a quantidade.

A função de Custo Total do Projeto pode ser, genericamente, assim expressa:

$$C = C_{\text{vun}} * Q + \text{Custos Fixos} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

C_{vun} é o custo variável unitário.

O BEP (ponto de equilíbrio) é encontrado quando a Receita supera os Custos Totais, tanto individualmente (para cada produto) quanto no agregado (ponto de equilíbrio total).

As funções de Receita e Custos, quando genericamente plotadas em um gráfico, assumem a configuração apresentada na Figura a seguir, onde pode-se divisar o ponto exato onde as funções de receita e de custos se encontram, definindo o BEP em quantidade e o BEP em valor.

Gráfico do ponto de equilíbrio

Fonte: o autor

$$RT \text{ (Receita Total)} = \text{Preço} \cdot Q$$

$$CT \text{ (Custo Total)} = CF + C_{vu} \cdot Q$$

Definido um ponto de equilíbrio imediato, pode-se também estabelecer pontos de equilíbrio prospectivos para cada exercício contábil inserido no horizonte de planejamento do Projeto. Esses pontos de equilíbrios prospectivos podem ser contábeis (utilizando-se valores reais correntes, estabelecidos no Projeto) ou pontos de equilíbrio descontados, calculados a partir de valores das funções descontados a uma taxa de atratividade apropriada.

A partir dos pontos de equilíbrio presente ou prospectivos, a valores reais correntes ou descontados ao custo de oportunidade, é possível estabelecerem-se as “margens de segurança” do Projeto que nada mais são que estabelecer a distância entre o “ponto efetivo” de venda em um determinado exercício, medindo-se a distância (em quantidade ou valor) em relação ao ponto de equilíbrio.

Este indicador permite também uma visão relativa de quão distante do ponto de equilíbrio (acima ou abaixo) se encontra o Projeto em determinado exercício, presente ou prospectivo (dentro do horizonte de planejamento do projeto).