

MAPA DE FLUXO DE VALOR ESTENDIDO A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM CONSUMIDORES INDUSTRIAIS: UM ESTUDO DE CASO BRASILEIRO

VALUE STREAM MAPPING EXTENDED TO ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT IN INDUSTRIAL SECTOR: A BRAZILIAN CASE STUDY

Fabrizio Nicoletti Hedlund* E-mail: fabrizio.hedlund@gmail.com

Fernando Antônio Forcellini* E-mail: forcellini@gmail.com.br

*Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC

Resumo: O setor industrial consome a maior parcela da energia demandada no Brasil e no mundo, em particular a eletricidade, e melhorias na sua performance energética proporcionam benefícios ambientais e econômicos a todas as partes envolvidas na cadeia de suprimentos. Uma forma de avaliação do desempenho energético é por meio da extensão da ferramenta Mapa do Fluxo de Valor, do Lean Manufacturing, incorporando outros insumos. Entretanto, não há convergência para um modelo em comum, carece de informações operacionais sobre a modelagem energética das operações e falta uma análise dos desperdícios no impacto global da organização. A partir disso, é proposta uma extensão do MFV para viabilizar a avaliação do desempenho de insumos energéticos de uma organização industrial. Devido ao setor elétrico ter impacto tanto em questões ambientais como econômicas, suas regras de fornecimento são utilizadas como referência. O estudo apresenta um estudo de caso no qual foram identificados desperdícios com o método proposto e resultados positivos obtidos.

Palavras-Chaves: Desempenho energético. Consumidores industriais. Mapa do Fluxo de Valor.

Abstract: The industrial sector consumes the largest share of energy demanded in Brazil and the world, particularly electricity, and improvements in its energy performance provide environmental and economic benefits to all stakeholders in the supply chain. An attempt of energy performance assessment is extending the Lean Manufacturing Value Stream Map tool, adding other inputs for measurement. However, there is no convergence to a common model, it lacks operational information about modeling energy consumption, and an analysis of the wastes on the overall impact of the organization. Therefore, it is proposed an extension of the Value Stream Mapping to evaluate energy performance inputs for an industrial organization. Due to the impact of electric sector in either environmental or economic issues its rules are used as a reference. The study presents a case study where wastes were identified with the proposed method with positive outcomes.

Keywords: Energy performance. Industrial sector. Value stream mapping.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho energético da classe de consumo industrial é fundamental para que medidas de redução dos impactos ambientais e econômicos possam ser implementadas efetivamente. Entre os insumos energéticos de maior impacto ambiental destaca-se a eletricidade. O seu consumo no Brasil entre 2006 e

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 18, n. 2, p. 691-712, 2018.

2015 cresceu 4,38% ao ano, consumiu a maior parcela (41,98%) de toda eletricidade fornecida e distribuída em 0,80% do total de unidades consumidoras (BRASIL, 2016). Destes consumidores industriais, 99,72% estão sujeitos à tarifa do mercado cativo, uma das mais elevadas no mundo (CORREIA; CULCHESK; REGO, 2016). Dessa forma, medidas que estimulem a eficiência energética neste setor beneficiam toda a cadeia de suprimentos, do lado da oferta postergando investimentos na capacidade instalada da geração, transmissão e distribuição (STRBAC, 2008), e lado da demanda por meio da redução custos e energia embutida dos produtos.

O Lean manufacturing auxilia os sistemas produtivos a melhorar seu desempenho, no caso o operacional, por meio de princípios que buscam a eliminação sistemática de desperdícios (MONDEN, 2011). A sua principal ferramenta que permite o entendimento dos fluxos de produção para uma na visão Lean é o Mapa do Fluxo de Valor (MFV) (LASA; LABURU; VILA, 2008). Devido ao seu reconhecimento científico, esta ferramenta foi amplamente estendida para avaliação de outros objetivos organizacionais, como ambiental, segurança do trabalho, econômico e energético. Verifica-se, no entanto, a ausência de concordância sobre um método relativo ao desempenho energético (HEDLUND e FORCELLINI, 2017). Ainda, esses estudos não apresentam os impactos do desperdício do fluxo energético em relação ao total da unidade consumidora, não sendo perceptível o benefício com a ação de melhoria na demanda total de energia.

Este estudo apresenta uma extensão do MFV a energia, descrevendo uma estrutura genérica, desenvolvida a partir de uma específica relativa à eletricidade (HEDLUND e FORCELLINI, 2017), que pode ser aplicada a qualquer insumo para avaliação do seu fluxo, viabilizando a identificação de desperdícios que impactem no desempenho dos consumidores, em especial os industriais. O estudo está estruturado da seguinte forma: referencial teórico descrevendo os estudos relacionados ao mapeamento do fluxo de valor e suas extensões, o cenário brasileiro atual do setor elétrico para os consumidores industriais, descrição da proposta de extensão do MFV, uma aplicação do método em uma indústria restrita a aquisição de energia elétrica via distribuidora local, de Santa Catarina e, por fim, as conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mapa do fluxo de valor e suas extensões

O objetivo do Lean manufacturing é o aumento da produtividade por meio da redução de custos associados aos desperdícios da organização (MONDEN, 2011). Os princípios fundamentais desta abordagem são baseados na visão do cliente, seguindo o ciclo de especificar o valor, identificar o seu caminho, dar fluxo para a sua produção, suportar o seu fluxo e reduzir para zero os desperdícios (WOMACK; JONES, 1996; HINES; HOLWEG; RICH, 2004). Em termos de valor, a organização tem suas atividades categorizadas em três tipos (MONDEN, 2011; HINES; RICH, 1997). O primeiro tipo são as atividades que agregam valor, transformando a matéria-prima no produto final ao longo de suas operações. Os outros dois tipos não agregam valor, caracterizados como desperdícios, porém podem ser separadas em necessárias e desnecessárias para as condições atuais de operação. A ferramenta utilizada para reconfigurar os processos operacionais baseado nos princípios do Lean é o MFV (LASA; LABURU; VILA, 2008).

O MFV é uma ferramenta efetiva para a identificação de desperdícios e melhoria de processos (DAL FORNO et al., 2014). Representa visualmente as etapas dos fluxos de materiais e informações necessárias para entregar o produto ao cliente (ROTHER; SHOOK, 1999). Em cada etapa do processo, dados são coletados para medir o seu desempenho. As principais métricas para cada ponto são o tempo de ciclo, up time ou utilizações de recursos, tempo de set-up ou de troca, estoque de materiais processados, quantidade de operadores (SINGH; GARG; SHARMA, 2011). O MFV do estado atual de operação apresenta o desempenho da produção de um produto e pode ser visto como uma linha base para desenvolver a situação futura, na qual deverá haver menos desperdícios.

Apesar de esta ferramenta ser útil na identificação de desperdícios, existem algumas limitações (HINES et al., 1998; CARVALHO et al., 2014) com tentativas de contorno, como na complexidade de processos (BRAGLIA; CARMIGNANI; ZAMMORI, 2006), em incertezas de demanda (LU; YANG; WANG, 2011) e na caracterização de outros tipos de desperdícios, de modo a se aproveitar da visão holística da ferramenta. Estudos sugeriam que iniciativas Lean indiretamente

beneficiavam o desempenho ambiental (US EPA, 2003), sendo suas ferramentas de apoio adaptadas para avaliar o impacto de desperdícios como energia, água, resíduos materiais e emissões de dióxido de carbono.

As propostas de extensão do MFV à avaliação de desperdícios ambientais não convergiram para um mesmo modelo. Inicialmente, as avaliações foram no nível da cadeia de valor e no ciclo de vida dos produtos e identificam, especialmente, as ações de logística no desenvolvimento sustentável (SIMONS; MASON, 2002). Num segundo momento, a análise passou ao nível da planta com a utilização de métricas específicas em cada área de interesse, como resíduos de perigo (KARP, 2005), energia e poluentes (US EPA, 2007). A representação de novas métricas (HELLENO et al., 2017) seguiu o padrão da linha temporal, com a incorporação de uma nova linha ao mapa, relativa ao desempenho avaliado.

As extensões da ferramenta MFV com ênfase na energia, em especial a eletricidade, também não convergiram. Os pontos de maior controvérsia são relativos à decomposição da energia que pode ser considerada como energia que agrega valor (EVA) e os desperdícios, vistos como energia que não agrega valor (ENVA). Alguns estudos caracterizam a EVA como toda a energia utilizada durante o tempo de processamento, incluindo o tempo ciclo (EPA, 2007), enquanto outros afirmam que dentro do tempo de processamento existem desperdícios que devem ser avaliados (MÜLLER; STOCK; SCHILLIG, 2013, BOGDANSKI et al., 2013). Em comum aos estudos encontra-se a métrica relativa à quantidade de energia consumida, expressa em kWh, de cada operação do processo produtivo.

Apesar dos contínuos estudos de expansão do MFV (FAULKNER e BADURDEEN, 2014; VERMA e SHARMA, 2016), encontram-se lacunas relativas à modelagem do sistema analisado, como a definição de um escopo, descrevendo as partes integrantes de cada operação, como os recursos utilizados direta e indiretamente nas operações (POSSELT et al., 2014, FISCHER et al., 2015, ALVANDI et al., 2016). Em geral, a abordagem proposta pelos estudos é de avaliar o insumo energia para os tempos de ciclo ou processamento sem identificar o seu impacto ao longo do período de faturamento, não sendo perceptível a melhoria em relação ao desempenho global (HEDLUND e FORCELLINI, 2017). Desta forma, a avaliação do fluxo energético com a alocação dos seus insumos conforme critérios

de classificação de energia, principalmente com a redução das parcelas associadas a desperdícios, pode viabilizar o aumento do desempenho energético da indústria.

2.2 Setor de energia elétrica e a indústria no Brasil

Desde a década de 1980, o setor de energia elétrica em todo o mundo está em contínuo processo de transformação, cada qual com suas particularidades, porém, na direção de estabelecer uma estrutura de mercado com regras definidas (DE ARAÚJO et al., 2008). As reformas deste setor tiveram como objetivos a redução do preço da eletricidade, aumento da eficiência na indústria como um todo e atração de capital privado. No Brasil, as reformas iniciaram a partir 1995. Entre 2001 e 2002, o país sofreu com um período de secas que, em conjunto com a expansão da geração abaixo dos valores esperados, levou o governo a tomar medidas de racionamento de eletricidade e a propor medidas para assegurar o fornecimento e reduzir os impactos tarifários. Assim, para incentivar as transações de energia, foram criados dois ambientes de contratação, o regulado ou cativo (ACR) e o livre (ACL). No ACR, as distribuidoras compram energia elétrica em leilões públicos e repassam via tarifas de energia aos seus consumidores, conhecidos como cativos. No ACL, os consumidores negociam livremente seus contratos de compra de energia com geradores e comercializadores.

Os consumidores cativos estão restritos à eletricidade da distribuidora local, ficando sujeitos às suas tarifas. Já os consumidores livres podem adquirir energia elétrica de outros fornecedores, utilizando o sistema elétrico da distribuidora local (BRASIL, 2010). Até 2009, os consumidores livres deviam ter contratos de demanda mínimos de 3 MW, porém, como forma de incentivar a geração distribuída no país e ampliar este mercado, o valor foi reduzido para 500 kW. Assim, a classe de consumo industrial pode comprar energia em dois ambientes, o regulado e o livre, desde que atenda aos requisitos do ACL.

Os consumidores industriais concentram-se no mercado regulado (99,72%) e respondem por 17,31% do consumo do país (BRASIL, 2016). Já os consumidores industriais livres são 0,28% do total, porém representam 24,40% do consumo. Enquanto no mercado livre os consumidores podem negociar os seus contratos de compra e venda de energia, no mercado cativo não existe opção de escolha de

fornecedor. Dessa forma, a maioria absoluta das indústrias encontra-se no mercado cativo e sujeitos à sua realidade tarifária.

Os custos aos consumidores cativos industriais são relacionados ao fornecimento da eletricidade e ao uso do sistema elétrico com periodicidade mensal, variando entre 27 e 33 dias consecutivos (BRASIL, 2010). Dentro deste ciclo existem intervalos menores de faturamento para mensurar a quantidade de energia requerida. A cada 15 minutos ocorre a integralização dos dados de potência ativa, resultando na demanda de energia, que relaciona o consumo e o tempo num mesmo intervalo. Isto significa que ocorrem 4 intervalos de faturamento a cada hora, 96 ao longo de um dia e variando entre 2.592 e 3.168 para o ciclo completo. Os consumidores devem contratar montantes para uso do sistema de distribuição baseados na sua demanda e, caso a ultrapassem em qualquer um dos 2.592 intervalos mínimos e, caso ultrapassem em mais de 5% esse valor, será penalizado. Assim, monitorar e controlar a curva de demanda dos sistemas produtivos possibilitam a adequação do contrato de demanda, bem como evita-se ser penalizado por ultrapassagens, contribuindo para a eficiência do sistema elétrico.

Ainda, existe a aplicação de tarifas diferenciadas para o consumo e a demanda de energia ao longo do dia conhecidos como postos tarifários e divididos em ponta e fora de ponta. O primeiro é composto por 3 horas diárias consecutivas com exceção realizada a dias não úteis. O segundo é composto pelas horas diárias consecutivas e complementares ao posto tarifário de ponta. Esses horários são definidos com base na curva de carga do sistema elétrico de cada distribuidora. O horário de ponta é período em que ocorrem os valores máximos de carga do sistema, possuindo tarifas mais elevadas do que as do horário fora ponta. Esta medida de influenciar os períodos de consumo é conhecida como Gestão pelo Lado da Demanda (GELLINGS, 1985) e resulta no uso racional da energia, na otimização da alocação de recursos e na redução de impactos ao meio ambiente, com reflexos no preço da eletricidade.

3 MÉTODO DE MFV ESTENDIDO A ENERGIA

O Mapa de Fluxo de Valor tradicional utiliza uma abordagem de sistemas, identificando entradas, processos e saídas das operações do fluxo de valor,

incluindo as operações de controle. O método proposto mantém essa sistemática, incorporando elementos do gerenciamento energético (ABNT, 2011), aumentando a dimensão de aplicação do MFV. Para sua elaboração, o fluxo de valor é visto como um sistema composto por subsistemas, que são as operações necessárias para se alcançar determinado objetivo. Para cada subsistema deve-se avaliar a energia solicitada para o produto e insumo energético definidos no escopo. O sistema é a composição de seus elementos, resultando o total de energia necessária para sua produção. Uma diferença fundamental entre os métodos é a decomposição das parcelas que agregam ou não valor. A sua caracterização pode ser alterada, devendo estar alinhada ao objetivo estratégico da organização. Enquanto no caso tradicional existe uma associação definida entre o período em que não ocorre o fluxo do produto como a parte que não adiciona valor ao produto, no caso proposto a associação poderá ser devido à diferenciação de tarifas ou a energia consumida fora do tempo de processamento. O Quadro 1 apresenta a visão geral da proposta do MFV estendido à energia, descrevendo os processos em cada etapa, bem como as entradas, ferramentas e técnicas, e as suas saídas. Esta proposta não exclui as atividades da ferramenta tradicional, sugerindo o acréscimo dos processos descritos a seguir quando o interesse for a avaliação do desempenho energético.

Quadro 1 – Método do MFV estendido à energia

Etapa	Processo	Entrada	Ferramenta e Técnica	Saída
Família de produto	Definir o escopo	Fluxo de valor definido Dados operacionais e energéticos	Consolidação de dados	Fluxo energético
	Elaborar o perfil energético	Fluxo energético Dados energéticos Período de operação	Curva de carga	Perfil energético
	Definir os objetivos e indicadores de desempenho	Perfil energético Fluxo energético	Descrição dos objetivos	Lista de objetivos e indicadores
Mapa do estado atual	Decompor a energia	Lista de objetivos e indicadores Perfil energético	Critério de classificação	Definição de EVA e ENVA
	Elaborar a linha de estado atual	Fluxo energético Definição de EVA e ENVA	Mapa ou tabela do fluxo	Linha atual de desempenho energético
Mapa do estado futuro	Identificar os desperdícios	Perfil energético Lista de objetivos e indicadores Definição de EVA e ENVA Linha atual de desempenho energético	Causa e efeito	Definição de contramedidas e ações
	Elaborar a linha de estado futuro	Linha atual de desempenho energético Definição de contramedidas e ações	Mapa ou tabela do fluxo	Linha futura de desempenho energético
Plano de ação e Implementação	Medir e verificar ações	Dados energéticos antes e após implementação	Testes de hipóteses	Resultados dos testes

3.1 Definir o escopo

Definir o escopo é o processo de descrição do fluxo de valor em termos energéticos. O escopo descreve as operações necessárias para produção de um item de uma determinada família de produto com o seu impacto em relação a energia. O escopo pode variar sua amplitude, descrevendo impactos energéticos de outras fases do ciclo de vida do produto, outros agentes da cadeia de suprimentos ou, simplesmente, excluindo esses e outros elementos, de modo a apresentar apenas operações internas. Os elementos que compõem o escopo e suas operações são definidos por limites.

Na definição do escopo deve-se consolidar os dados energéticos com o fluxo de valor definido, modelando o sistema a ser avaliado com informações mínimas como: delimitação, demanda solicitada ou potência instalada, turnos de operação, recursos consumidores de energia. Os tipos de insumos energéticos aplicados às operações também devem ser definidos no escopo. Assim, nem todas as suas operações ou insumos podem fazer parte do escopo, reforçando a necessidade de estabelecer limites dos pontos de medição da performance.

3.2 Elaborar o perfil energético

Elaborar o perfil energético é o processo de descrever o comportamento de uso ou consumo dos insumos energéticos para um determinado período. A representação do perfil energético é realizada pela curva de carga dos recursos, em geral diária, semanal, mensal ou anual, dependendo do período de interesse, incluindo a carga total da instalação. Além do fluxo e dados energéticos, informações sobre os períodos de operação dos recursos energéticos possibilitam identificar padrões de uso que não contribuem para um melhor desempenho energético ou de produção.

3.3 Definir os objetivos e indicadores de desempenho energético

Definir os objetivos e indicadores de desempenho energético (IDE) é o processo de descrição de resultados específicos de melhoria do desempenho

energético com a possibilidade de mensurá-los em termos de eficiência, uso ou consumo (ABNT, 2011).

Os objetivos devem ser definidos com base no desempenho energético a ser melhorado, cruzando as informações disponíveis e indicando restrições que possam afetar a otimização do fluxo do ponto de vista energético. As restrições podem ser relacionadas a capacidade, recursos, tecnologias, períodos do dia, entre outras. Os objetivos devem ser identificados com o auxílio dos fluxos e perfis energéticos.

O IDE deverá estar associado ao desempenho descrito no objetivo. Sua especificação em termos de unidades métricas e do sentido da otimização também é recomendado.

3.4 Decompor a energia

Decompor a energia é o processo de definição do critério de classificação da energia em parcelas que agregam (EVA) e que não agregam valor (ENVA) no fluxo energético. Os critérios de classificação são descritos no Quadro 2, podendo variar a sua classificação de um objetivo para outro. Com o critério de classificação deve-se identificar as parcelas de EVA e ENVA. Esta flexibilidade em relação a decomposição da energia permite que as organizações com menor nível de maturidade em gerenciamento energético possam gradualmente incorporar graus de complexidade na otimização da energia, de acordo com seu nível de competência técnica, estrutura ou necessidade.

Quadro 2 – Exemplos de definição das energias em EVA e ENVA

Critério	EVA - Agrega	ENVA – Não agrega	Referência
Tempo	Tempo de processamento	Tempo complementar (espera, carregamento, etc.)	EPA, 2007
Energia que realiza uma transformação	Diferença entre energia com e sem carga a ser processada	Energia complementar	MÜLLER; STOCK; SCHILLIG, 2013
Estágios de operação	Estágio de processamento	Estágios complementares (em espera, rampas de acionamento, etc.)	BOGDANSKI et al., 2013
Tarifação diferenciada	Horário fora de ponta	Horário de ponta	HEDLUND e FORCELLINI, 2017

3.5 Elaborar a linha de estado atual

Elaborar a linha de estado atual é o processo de estabelecimento do estado corrente do fluxo energético. As informações de desempenho de cada operação estabelecem uma base de desempenho dos insumos energéticos avaliados. A representação visual da performance pode ser por meio de mapa ou de tabela. Deve-se incluir a decomposição da energia nas parcelas de EVA e ENVA, conforme a quantidade de critérios adotados. A linha atual será utilizada como referência para elaboração do estado futuro.

3.6 Identificar os desperdícios

Identificar os desperdícios é o processo de determinação das parcelas que não agregam valor (ENVA) ao fluxo energético e que afetam o desempenho definido no objetivo. Os desperdícios estão associados a ENVA, entretanto, sua redução pode também resultar em benefícios na parcela de EVA, em geral em casos onde o desempenho energético está relacionado a eficiência energética, como por exemplo a substituição de lâmpadas com maior rendimento energético.

A determinação dos desperdícios pode ser realizada por meio da análise de causa e efeito, sendo o efeito indesejado associado ao objetivo e listando contramedidas específicas para cada causa que contribua para o desperdício. Algumas ações de melhoria podem ser comuns a mais de um efeito, permitindo um aproveitamento dos recursos disponíveis.

3.7 Elaborar a linha de estado futuro

Elaborar a linha de estado futuro é o processo de estabelecimento do estado desejado do fluxo energético. As informações de desempenho de cada operação são restabelecidas utilizando a linha atual de desempenho decrescida das parcelas que não agregam valor. A representação visual da performance pode ser por meio de mapa ou de tabela. É possível que exista mais de uma linha futura, dependendo dos critérios de classificação da energia.

3.8. Medir e verificar as ações

Medir e verificar as ações é o processo de monitoramento dos dados energéticos antes e após a implementação das ações de melhoria do desempenho, visando assegurar que os resultados são desta ação e não de fatores externos. Esse monitoramento é mandatório, pois a energia reduzida ou eliminada não poder ser medida diretamente devido à sua inexistência (EVO, 2014).

A análise dos dados energéticos antes e após a implementação deve ser realizada com o auxílio da inferência estatística, em especial a métodos de testes de hipóteses, que permitem aceitar ou rejeitar hipóteses com níveis aceitáveis de incertezas. Para esta avaliação sugere-se o teste de hipóteses para a média de duas amostras independentes. Assume-se para a hipótese inicial que a diferença das médias é nula, enquanto que a hipótese alternativa é que a média da amostra antes da ação de melhoria é maior que a média da amostra após a sua implementação. O nível de confiança mínimo deve ser 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do método de MFV estendido à energia foi realizada em uma unidade consumidora industrial cativa, que fabrica componentes eletrônicos para carros e indústria, localizada em Santa Catarina, para o insumo eletricidade. O seu sistema de manufatura é setorizado em quatro áreas e possui três grandes famílias de produtos. O setor Cerâmica é o único setor que opera em três turnos produtivos e tem o maior fluxo de produtos mensal. A seguir são descritos os resultados do método utilizando a proposta do Quadro 1.

4.1 Definir o escopo

O escopo representa o fluxo de valor das operações internas necessárias para os produtos A e B do setor de cerâmica de uma unidade consumidora cativa do tipo industrial. O insumo energético analisado é a eletricidade, considerando o impacto energético total da instalação e dados coletados a partir do medidor da concessionária de energia. Os limites das operações são definidos por uma área

virtual, que corresponde aos equipamentos consumidores de energia inclusos nesses locais e, dependendo do caso, incluem parcial ou totalmente os estoques iniciais, intermediários e finais de produtos. A Tabela 1 apresenta o escopo incluindo demais informações para sua representação. É possível observar que duas operações, extrusão e secagem, correspondem a 70% da demanda média solicitada à rede elétrica pelo conjunto de operações. Os turnos de operação apontam uma expectativa de consumo maior para a operação de secagem, pois seu regime de funcionamento é contínuo.

Tabela 1 – Escopo definido

Passo	Operação	Limites	Equipamentos consumidores de energia ¹	Demanda média de energia	Turnos de operação
1	Extrusão	Áreas da operação e dos estoques inicial e final.	Iluminação e motores dos sistemas de extrusão, misturador e bombas de vácuo.	9,63 kW (39%)	1 e 2
2	Pré-secagem	Áreas da operação. Sem estoques.	Iluminação.	0,32 kW (1%)	1, 2 e 3
3	Secagem	Áreas da operação e do estoque inicial.	Iluminação, motor de ventilação e resistências elétricas.	7,61 kW (31%)	1, 2 e 3
4	Corte	Áreas da operação e do estoque inicial.	Iluminação e motores para serra e exaustão.	1,87 kW (8%)	1, 2 e 3
5	Limpeza	Áreas da operação e dos estoques inicial e final.	Iluminação e motores para exaustão.	1,12 kW (5%)	1, 2 e 3
6	Queima	Áreas da operação e do estoque inicial.	Iluminação e motor para ventilação.	3,86 kW (16%)	1, 2 e 3
7	Controle	Áreas da operação e dos estoques inicial e final.	Iluminação.	0,32 kW (1%)	1 e 2

Nota: ¹Relativa a energia definida no escopo.

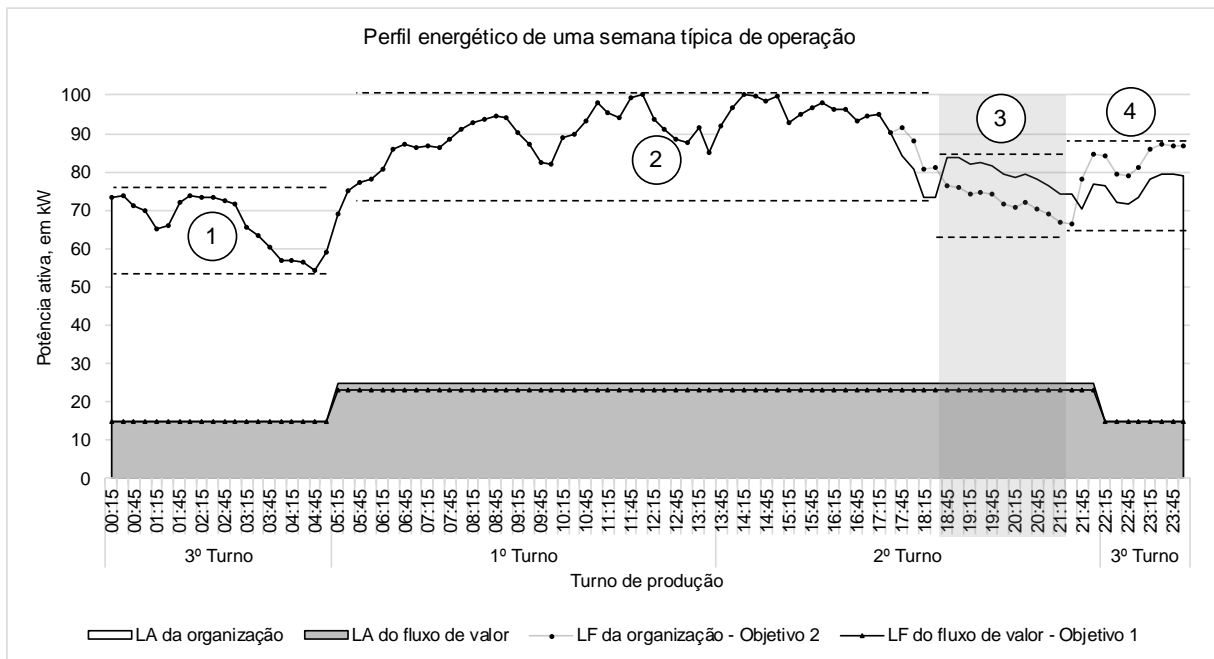
4.2 Elaborar o perfil energético

A representação do uso do insumo energético em análise é apresentada na Figura 1, indicando os padrões de uso diários para condições típicas de operação da organização e do escopo. As linhas atuais (LA) são apresentadas na forma de áreas para melhor representar a energia utilizada no período (integração da potência ao longo do tempo). A área em branco refere-se à curva de uso ou a quantidade esperada de energia utilizada total da instalação, enquanto que a área em cinza escuro representa a demanda média esperada do fluxo energético.

Os turnos produtivos da organização e das operações do escopo são divididos em três, com o primeiro das 5h e às 13h30, iniciando o segundo com término às 22h e o terceiro de forma complementar. Além desses turnos, existe um do setor administrativo, iniciado às 8h com término às 18h.

O comportamento da demanda média de uma semana típica aponta um patamar de base, indicação 1 na Figura 1, utilizado ao longo dos três turnos. Entre os inícios do primeiro turno e do horário comercial há um acréscimo de carga, que oscila durante o primeiro e segundo turnos, estabelecendo um novo patamar, indicação 2. No fim do horário administrativo há um decréscimo de demanda, reestabelecendo um padrão de uso menor, indicações 3 e 4. Entretanto, no horário de ponta, período em que as tarifas de energia elétrica tendem a ser elevadas, o seu menor valor foi superior aos três valores mínimos dos turnos. Pelo padrão energético diário é possível observar que a variável energia não é uma restrição na programação da produção.

Figura 1 – Perfil energético para um padrão de uso energético típico



4.3 Definir os objetivos e indicadores de desempenho energético

Para este estudo de caso foram definidos dois objetivos com o auxílio do perfil energético e descritos a seguir:

- Objetivo 1: Aumentar a eficiência energética na operação do escopo com maior demanda média.

O indicador de desempenho energético utilizado é a demanda média da operação secagem, medidos em demanda média da eletricidade (em kW,

quilowatts) por lote produzido (peças). O sentido de aumentar a eficiência energética desta operação é a da redução da demanda média por lote.

- Objetivo 2: Diminuir a demanda de energia elétrica no horário de ponta.

O indicador de desempenho energético utilizado é a demanda média no período indicado, medidos em demanda média da eletricidade (em kW, quilowatts). O sentido de diminuir a demanda no horário de ponta é a própria redução do seu valor.

4.4 Decompor a energia

Os dois objetivos não foram relacionados para fins demonstrativos de uso do método estendido a energia. Os critérios de decomposição da energia em EVA e ENVA para os Objetivo 1 e 2 foram o estágio de operação e a tarifação diferenciada, respectivamente.

4.5 Elaborar a linha de estado atual

As linhas atuais foram estabelecidas para o indicador de desempenho energético de cada objetivo, neste caso a demanda média de energia elétrica. As informações de fluxo de materiais e de tempo de operação, usuais no MFV tradicional, são mantidas a fim de registrar o desempenho operacional.

Para o Objetivo 1 o tempo de processamento deve ser analisado em termos do estágio de operação dos componentes consumidores de energia elétrica de cada operação. Estendendo esta análise para os outros elementos encontra-se a demanda total do fluxo energético de 24,72 kW, divididos em 73,77% e 26,23% de EVA e ENVA, respectivamente.

Para o Objetivo 2 a segmentação da energia ocorre pela tarifação diferenciada em determinados períodos do dia em que a tarifa é mais elevada. A demanda neste caso corresponde ao mesmo valor do que para o Objetivo 1, pois o IDE tem a mesma base. Entretanto, a segmentação da energia é diferente. Neste caso deve-se avaliar operações que possam ser retiradas do horário de ponta, consideradas num primeiro momento como EVA, e transferir o seu uso para o horário fora de ponta – ver Linha futura operação secagem.

Tabela 2 – Linhas atual e futura para os objetivos energéticos

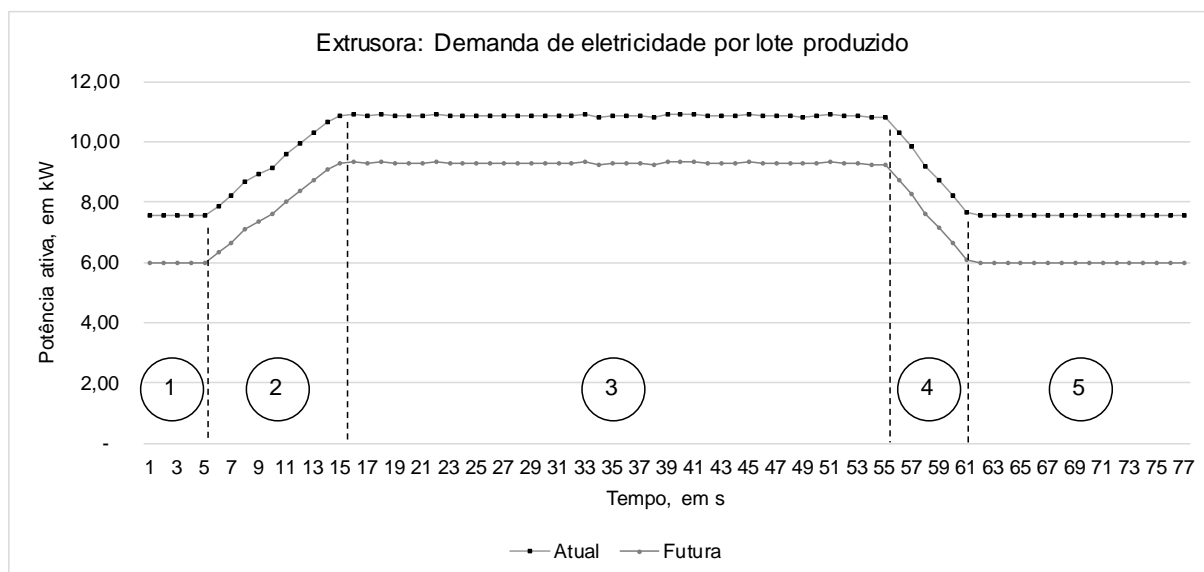
	ID	Extrusão	Pré-secagem	Secagem	Corte	Limpeza	Queima	Controle			
Objetivo	TP	77 s	604.800 sec	8.400 sec	81 sec	3.171 sec	86.400 sec	2.800 sec	Valores totais dos Indicadores de Desempenho		
	CL	126 pçs	5.040 pçs	5.040 pçs	5.040 pçs	126 pçs	700 pçs	700 pçs			
	CP	126 pçs	200.000 pçs	20.160 pçs	126 pçs	1.300 pçs	30.000 pçs	700 pçs			
	TO	2	3	3	3	3	3	2			
	T	77 s	604.800 s	8.400 s	81 s	3.171 s	86.400 s	2.800 s	705.729 s		
	Tempo de operação	TVA	44 s	3.600 s	7.200 s	42 s	1.057 s	86.400 s	2.800 s	101.143 s (14,33%)	
		TNVA	33 s	601.200 s	1.200 s	39 s	2.114 s	0 s	0 s	604.586 s (85,67%)	
	1	E	9,63 kW	0,32 kW	7,61 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	24,74 kW	
		Linha atual	EVA	6,19 kW	0,00 kW	6,52 kW	0,97 kW	0,37 kW	3,86 kW	0,32 kW	18,24 kW (73,77%)
			ENVA	3,44 kW	0,32 kW	1,09 kW	0,90 kW	0,74 kW	0,00 kW	0,00 kW	6,48 kW (26,23%)
E		8,06 kW	0,32 kW	7,61 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	23,15 kW		
Linha futura		EVA	5,29 kW	0,00 kW	6,52 kW	0,97 kW	0,37 kW	3,86 kW	0,32 kW	17,34 kW (74,90%)	
		ENVA	2,76 kW	0,32 kW	1,09 kW	0,90 kW	0,74 kW	0,00 kW	0,00 kW	5,81 kW (25,10%)	
E		9,63 kW	0,32 kW	7,61 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	24,72 kW		
Linha atual		EVA	9,63 kW	0,32 kW	7,61 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	24,72 kW (100,00%)	
		ENVA	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW (0,00%)	
2		E	9,63 kW	0,32 kW	7,61 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	24,72 kW	
	Linha futura	EVA	9,63 kW	0,32 kW	0,00 kW	1,87 kW	1,12 kW	3,86 kW	0,32 kW	17,11 kW (69,22%)	
ENVA		0,00 kW	0,00 kW	7,61 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	0,00 kW	7,61 kW (30,78%)		

Legenda: ID - Indicador de Desempenho. TP - Tempo de Processamento. CL - Capacidade do Lote. CP - Capacidade de Produção. TO - Turno de Operação. T - Tempo de operação. TVA - Tempo que agrega valor. TNVA - Tempo que não agrega valor. E - Energia ou demanda total. EVA - Energia que agrega valor. ENVA - Energia que não agrega valor.

4.6 Identificar os desperdícios

Para atendimento do Objetivo 1 foram realizadas medições de energia elétrica individuais em cada equipamento consumidor da operação extrusão. O sistema é composto por iluminação e motores elétricos dos equipamentos de extrusão, misturador e bomba de vácuo. A Figura 2 apresenta as linhas atual e futura de uso energético do conjunto de equipamentos elétricos da operação extrusão, segmentada nos estágios de funcionamento dos equipamentos. Os indicadores 1 e 5 da Figura 2 referem-se a períodos de espera, enquanto que os indicadores 2 e 4 são relativas às rampas de início e fim da operação, restando apenas o indicador 3 como período de processamento efetivo. A energia dentro da área 1 é considerada como EVA, enquanto que a parcela restante é considerada como ENVA. Para avaliar as ações necessárias para atendimento dos objetivos foi realizada uma análise de causa e efeito, conforme apresentado no Quadro 3.

Figura 2 – Decomposição da energia em estágios de operação



Quadro 3 – Análise de causa e efeito para os objetivos energéticos

Efeito indesejado do objetivo 1	Efeito indesejado do objetivo 2
Eficiência energética baixa	Demanda de energia elétrica elevada
Causas	
Consumo de energia fora de tempo de processamento	Acúmulo de consumo de eletricidade num intervalo de 15 minutos
Equipamentos elétricos com baixa classificação de eficiência energética	Equipamento com maiores demandas operam no horário de ponta
Equipamentos elétricos superdimensionados	Estoques reduzidos em pontos de gargalo mantêm todos processos energizados
Contramedidas	
Reduzir a demanda solicitada pelo equipamento elétrico	Programar o acionamento de equipamentos elétricos
Substituir equipamento por outro de melhor classificação	Retirar equipamentos subutilizados com demandas elevadas
Dimensionar equipamento para capacidade real de uso	Equipamentos retirados devem produzir estoques mínimos
Ação	
Substituir equipamento de maior contribuição na demanda e com classificação energética baixa por outro de melhor classificação	Retirar a secagem do horário de ponta, aumentar sua utilização no horário fora ponta e manter estoque conforme capacidade de produção do gargalo à jusante

4.7 Elaborar a linha de estado futuro

As linhas futuras para os dois objetivos são apresentadas na Figura 1 e Tabela 2. A linha futura representa a condição esperada após a implementação das ações de cada objetivo.

Para a ação de substituir o equipamento com classificação energética baixa por outro de melhor posição reduz a demanda média total de 9,63 kW para 8,06 kW. Essa melhoria reduz a energia necessária para produção tanto nos períodos de EVA como de ENVA, aumentando a eficiência energética do sistema. O impacto na demanda do escopo é uma redução de 24,72 kW para 23,15 kW.

Em relação a ação de retirar a operação de secagem do horário de ponta reduz a demanda média no horário de ponta de 24,72 kW para 17,11 kW. Entretanto, devido a transferência de carga para o horário fora de ponta, é necessário gerar um estoque inicial para o processo seguinte ao da secagem de modo que não ocorra interferência no fluxo existente. Assim, a demanda fora de ponta será impactada e apresentada esta condição na Figura 1.

4.8 Medir e verificar as ações

Das duas ações, apenas a ação relacionada ao objetivo 2, retirar a operação de secagem do horário de ponta, foi implementada. Os dados de medição foram coletados a partir do medidor da concessionária para um período de 12 dias antes e de 12 dias após a implementação, totalizando um período de 24 dias ou 288 medições. Os dados populacionais foram tratados com o auxílio da ferramenta computacional de estatística Minitab. Para cada caso foram selecionadas 50 amostras de forma aleatória simples. Em seguida as amostras foram submetidas a um teste de normalidade, a fim de garantir a validade dos dados para aplicação do teste de hipóteses. O teste de normalidade, neste caso o teste de Anderson-Darling, aceita os dados se o valor da probabilidade (Valor P) for superior ao nível de significância, no caso 0,05 (1 - nível de confiança), confirmando a hipótese que os dados podem ser aproximados por uma distribuição normal. Em seguida foi conduzido o teste T para duas amostras independentes, assumindo variâncias diferentes.

Tabela 3 - Resultados dos testes de hipóteses

Teste de normalidade de Anderson-Darling					
Variável	Número de amostras	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Valor P
Antes	50	78,45	6,05	0,86	0,301
Após	50	72,24	5,21	0,74	0,113

Teste de T para duas amostras					
Variável	Graus de liberdade	Diferença	Limite inferior	Limite superior	Valor P
Diferença entre Antes e Após	95	6,21	3,97	8,46	<0,001

Com base nos resultados do teste descritos na Tabela 3, é possível afirmar estatisticamente que a diferença das médias antes e após a implementação é significativa, ou seja, a diferença está relacionada com a intervenção implementada. Conclui-se que com no mínimo 95% de confiança a média das diferenças das demandas, antes e após a ação de melhoria de desempenho, está dentro do intervalo de 3,97 kW e 8,46 kW, sendo 6,21 kW o valor esperado. A demanda média do equipamento retirado é de 7,61 kW, dentro dos limites do intervalo de confiança, e confirmando o êxito da verificação do resultado.

O impacto da eliminação deste desperdício na curva de demanda da organização foi de 7,91%, enquanto que no fluxo energético analisado o seu impacto esperado era de 30,78% e foi de 25,12%, reforçando a necessidade desta análise global.

5 CONCLUSÃO

A avaliação do desempenho energético das indústrias deve ser um esforço contínuo devido a sua maior participação no consumo de insumos. Nesse sentido, esta proposta de expansão do MFV para avaliar, em conjunto com o desempenho operacional, a performance da energia, viabiliza a identificação de oportunidades que contribuam para os dois lados da cadeia de suprimentos, reduzindo a necessidade de investimentos no setor de infraestrutura da energia e da energia a ser embutida nos produtos.

Além do estabelecimento de um modelo para a avaliação do desempenho dos insumos energéticos, o método apresenta flexibilidade em pontos de maior complexidade, seja devido à falta de recursos ou de competência técnica para sua aplicação, proporcionando à organização diferentes critérios de classificação da

energia, conforme a sua maturidade em relação à gestão da energia. A inclusão de um processo de verificação de resultados vai de encontro aos ciclos de melhoria contínua, utilizados no Lean, suportando novos ciclos de melhoria, principalmente com a documentação das etapas, aumentando a responsabilidade social através da consciência energética da organização.

Os impactos totais na organização com o auxílio da análise do fluxo energético permitem direcionar as ações de melhoria que terão impactos em outros fluxos, como o operacional. A retirada de operação de um equipamento em determinados períodos produtivos pode gerar interrupções no fluxo de valor do ponto de vista do cliente, em direção contrária aos princípios do Lean. Assim, a análise energética não pode estar dissociada da análise operacional, garantindo que as restrições de produção sejam mantidas. Por exemplo, a ação de restringir a operação de determinada estação de trabalho no horário de ponta resultou numa adequação do lote de produção, para atender as restrições produtivas, que por fim aumentaram a eficiência em relação ao desempenho energético, sem alterar o fluxo operacional.

Os resultados apontam de forma sugestiva para o método proposto, sendo necessária sua validação em outras unidades consumidoras, de modo a identificar potenciais dificuldades de modelagem energética ou até mesmo da coleta de dados para verificação dos próprios resultados.

Para estudos futuros, pretende-se incluir na avaliação do desempenho energético os efeitos colaterais possíveis das ações de melhoria. Esses efeitos podem influenciar desde os valores coletados para estabelecimento das linhas de estado atual e futuro, como em problemas perceptíveis somente após a sua implementação, como elevação da demanda de um conjunto de recursos. Os estudos anteriores referenciados neste artigo não tratam desta questão, sendo uma lacuna a ser preenchida.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 50001**: Sistemas de gestão da energia. Rio de Janeiro, 2011.

ALVANDI, S. et al. Economic and environmental value stream map (E2VSM) simulation for multi-product manufacturing systems. **International journal of sustainable engineering**, v. 9, n. 6, p. 354-362, 2016.

BOGDANSKI, Gerrit et al. An extended energy value stream approach applied on the electronics industry. In: **IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems**. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 65-72.

BRAGLIA, Marcello; CARMIGNANI, Gionata; ZAMMORI, Francesco. A new value stream mapping approach for complex production systems. **International journal of production research**, v. 44, n. 18-19, p. 3929-3952, 2006.

DOI:<https://doi.org/10.1080/00207540600690545>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução normativa nº 414**. Brasília. 2010.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2016**. Brasília, 2016.

CARVALHO, Dinis et al. Waste identification diagrams with OEE data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT (ICIEOM 2014), 20, 2014. **Anais...** ICIEOM, 2014. p. 313-320.

CORREIA, Paula Juliana; CULCHESK, Aline Silva; REGO, Erik Eduardo. Is the energy tariff expensive for captive customers in Brazil?. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 11, p. 4506-4511, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7795821>

DAL FORNO, Ana Julia et al. Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. The **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 5-8, p. 779-790, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5712-z>

DE ARAUJO, JOÃO LIZARDO R. HERMES et al. Reform of the reforms in Brazil: problems and solutions. In: **Competitive Electricity Markets**. 2008. p. 543-572.

GELLINGS, Clark W. The concept of demand-side management for electric utilities. **Proceedings of the IEEE**, v. 73, n. 10, p. 1468-1470, 1985.

DOI:<https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13318>

EFFICIENCY VALUATION ORGANISATION (EVO). **International performance measurement and verification protocol**. Core Concepts. 2014.

FAULKNER, William; BADURDEEN, Fazleena. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Journal of cleaner production**, v. 85, p. 8-18, 2014.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>

FISCHER, J.; WEINERT, N.; HERRMANN, C. Method for selecting improvement measures for discrete production environments using an extended energy value stream model. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 133-138, 2015.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.100>

HEDLUND, Fabrício Nicoletti; FORCELLINI, Fernando Antônio. Extensão do mapa de fluxo de valor para avaliação do desempenho energético em consumidores industriais cativos. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - SIMEP. **Anais...** Joinville (SC) UDESC/UNIVILLE, 2017.

HINES, Peter et al. Value stream management. **The International Journal of Logistics Management**, v. 9, n. 1, p. 25-42, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1108/09574099810805726>

HINES, Peter; HOLWEG, Matthias; RICH, Nick. Learning to evolve: a review of contemporary lean thinking. **International journal of operations & production management**, v. 24, n. 10, p. 994-1011, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443570410558049>

HINES, Peter; RICH, Nick. The seven value stream mapping tools. **International journal of operations & production management**, v. 17, n. 1, p. 46-64, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443579710157989>

KARP, Heidi R. Green suppliers network: Strengthening and Greening the manufacturing supply base. **Environmental Quality Management**, v. 15, n. 2, p. 37-46, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.20079>

LASA, Ibon Serrano; LABURU, Carlos Ochoa; VILA, Rodolfo de Castro. An evaluation of the value stream mapping tool. **Business process management journal**, v. 14, n. 1, p. 39-52, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1108/14637150810849391>

LU, Jiunn-Chenn; YANG, Taho; WANG, Cheng-Yi. A lean pull system design analysed by value stream mapping and multiple criteria decision-making method under demand uncertainty. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 3, p. 211-228, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.551283>

MONDEN, Yasuhiro. **Toyota production system**: an integrated approach to just-in-time. CRC Press, 2011.

MÜLLER, Egon; STOCK, Timo; SCHILLIG, Rainer. Dual energy signatures enable energy value-stream mapping. In: **Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems**. Springer International Publishing, 2013. p. 1603-1611. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00557-7_129

POSSELT, G. et al. Extending energy value stream models by the TBS dimension—Applied on a multi product process chain in the railway industry. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 80-85, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.067>

ROTHER, Mike; SHOOK, John. **Learning to See**. Lean Enterprise Institute. Inc., Brookline, MA, 1999.

SIMONS, David Wyn; MASON, Robert John. Environmental and transport supply chain evaluation with sustainable value stream mapping. In: **Proceedings of the 7th logistics research network conference**. 2002.

SINGH, Bhim; GARG, Suresh K.; SHARMA, Surrender K. Value stream mapping: literature review and implications for Indian industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 53, n. 5-8, p. 799-809, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2860-7>

STERN, Frank. **Peak demand and time-differentiated energy savings cross-cutting protocols**. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.

STRBAC, Goran. Demand side management: Benefits and challenges. **Energy policy**, v. 36, n. 12, p. 4419-4426, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.030>

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 18, n. 2, p. 691-712, 2018.

US EPA. United States Environmental Protection Agency (US EPA). **Lean Manufacturing and the Environment: Research on Advanced Manufacturing Systems and the Environment and Recommendations for Leveraging Better Environmental Performance.** USA. 2003

_____. United States Environmental Protection Agency (US EPA). **The Lean and Energy Toolkit-Achieving Process Excellence Using Less Energy.** USA. 2007.

VERMA, Neha; SHARMA, Vinay. Energy Value Stream Mapping a Tool to Develop Green Manufacturing. **Procedia Engineering**, v. 149, p. 526-534, 2016.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.701>

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. **Lean thinking: Banish waste and create wealth in your organisation.** Simon and Shuster, New York, NY, v. 397, 1996.



Artigo recebido em 28/07/2017 e aceito para publicação em 20/05/2018

DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2954>