

PotencializEË

Programa Investimentos Transformadores
em **Eficiência Energética** na Indústria

**METODOLOGIA DE *BENCHMARKING*
ENERGÉTICO PARA INDÚSTRIAS**





Sumário

1. Introdução.....	6
2. Referenciais Teóricos	6
2.1 Literatura especializada.....	6
2.2 O programa <i>Energy Star</i>	8
2.3 Análise dos principais referenciais teóricos	8
3. Proposta metodológica	9
3.1 Abordagem de níveis hierárquicos	9
3.2 Análise de regressão linear simples	12
3.3 Análise de regressão linear múltipla	13
3.4 Regras estatísticas para o modelo de <i>benchmarking</i>	15
3.5 Cálculo da estimativa de investimento.....	19
4. Validação da proposta metodológica	19
4.1 Construção do <i>benchmarking</i> para o setor têxtil e de vestuário	19
4.1.1 Nível 4: Sistemas industriais.....	23
4.1.2 Nível 3: Processos.....	28
4.1.3 Nível 2: Linha de produção	29
4.1.4 Nível 1: Planta	30
4.2 Aplicação do <i>benchmarking</i> no setor têxtil e de vestuário.....	32
4.2.1 Instalação industrial <i>ITV00A</i>	32
4.2.2 Instalação industrial <i>ITV00B</i>	37
5. Diretrizes para aplicação da proposta metodológica.....	42
5.1 Setor têxtil e de vestuário	43
5.2 Setor de alimentos e bebidas	44
5.3 Setor de metalurgia e produtos metálicos.....	45
5.4 Setor de transformados plásticos.....	46
5.5 Setor químico e farmacêutico	47
5.6 Setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos.....	48
5.7 Setor de papel e celulose	49
6. Considerações finais	50
7. Aviso Legal (Disclaimer)	51
8. Referências bibliográficas.....	52

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Modelos de análise para os indicadores de cada elemento dos diferentes níveis de uma cadeia de valor genérica.....	11
Tabela 3.2 – Algumas variáveis que podem alimentar o modelo de regressão linear simples	13
Tabela 3.3 – Algumas variáveis quantitativas que podem alimentar o modelo de regressão linear múltipla.....	14
Tabela 3.4 – Algumas variáveis qualitativas que podem alimentar o modelo de regressão linear múltipla	14
Tabela 3.5 – Valores da <i>estatística-t</i> para diferentes níveis de confiança	16
Tabela 3.6 – Critérios estatísticos mínimos para aprovação do modelo de regressão linear.....	18
Tabela 4.1 – Dados base para estimação da produção e consumo de energia das 60 instalações industriais utilizadas nas simulações da metodologia de <i>benchmarking</i> para o setor têxtil	23
Tabela 4.2 – Informações sobre o modelo de regressão linear múltipla para o nível 2 da estrutura hierárquica do setor têxtil e de vestuário.....	30
Tabela 4.3 – Informações sobre o modelo de regressão linear múltipla para o nível 1 da estrutura hierárquica do setor têxtil e de vestuário.....	31
Tabela 4.4 – Informações de produção e consumo de energia da instalação industrial <i>ITV00A</i>	32
Tabela 4.5 – Informações de produção e consumo de energia da instalação industrial <i>ITV00B</i>	37

Índice de figuras

Figura 1 – Ilustração da abordagem de níveis por meio de uma pirâmide hierárquica ..	9
Figura 2 – Ilustração da abordagem de níveis aplicada a uma cadeia de valor genérica	10
Figura 3 – Ilustração da atribuição de indicadores aos elementos da estrutura em diferentes níveis de uma cadeia de valor genérica	11
Figura 4 – Ilustração de uma regressão linear simples aplicada à variável dependente de consumo de energia E e a variável independente de volume de produção P.....	12
Figura 5 – Ilustração da aplicação da análise de regressão linear simples no benchmarking energético.....	13

Figura 6 – Ilustração da aplicação da análise de regressão linear múltipla no benchmarking energético.....	15
Figura 7 – Cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário considerada para aplicação da metodologia de benchmarking energético.....	20
Figura 8 – Atribuição de indicadores aos elementos da estrutura em diferentes níveis da cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário	22
Figura 9 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de fios do setor de têxtil e de vestuário	24
Figura 10 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de tecidos do setor têxtil e de vestuário	24
Figura 11 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de malhas do setor têxtil e de vestuário	24
Figura 12 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas do beneficiamento do setor têxtil e de vestuário	25
Figura 13 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de confecções do setor têxtil e de vestuário.....	25
Figura 14 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de fios do setor têxtil e de vestuário.....	26
Figura 15 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de tecidos do setor têxtil e de vestuário.....	26
Figura 16 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de malhas do setor têxtil e de vestuário.....	27
Figura 17 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados ao beneficiamento do setor têxtil e de vestuário.....	27
Figura 18 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de confecções do setor têxtil e de vestuário	28
Figura 19 – Resultado da análise de regressão linear simples para a produção de fios, produção de tecidos, produção de malhas, beneficiamento e produção de confecções do setor têxtil e de vestuário	29
Figura 20 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas de processos industriais da ITV00A	33
Figura 21 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas auxiliares da ITV00A	34
Figura 22 – Aplicação do benchmarking sobre o processo de produção de fios da ITV00A	34
Figura 23 – Aplicação do benchmarking sobre a ITV00A em nível de planta.....	35
Figura 24 – Esquema síntese da avaliação da instalação industrial ITV00A.....	36



Figura 25 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas de processos industriais da ITV00B	38
Figura 26 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas auxiliares da ITV00B	38
Figura 27 – Aplicação do benchmarking sobre o processo de produção de confecções da ITV00B.....	39
Figura 28 – Aplicação do benchmarking sobre a ITV00B em nível de planta.....	40
Figura 29 – Esquema síntese da avaliação da instalação industrial ITV00B.....	41
Figura 30 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário.....	43
Figura 31 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de alimentos e bebidas	44
Figura 32 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de metalurgia e produtos metálicos	45
Figura 33 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de transformados plásticos	46
Figura 34 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor químico e farmacêutico	47
Figura 35 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos.....	48
Figura 36 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de papel e celulose.....	49



1. Introdução

O presente relatório trata da metodologia de *benchmarking* energético desenvolvida no escopo do projeto “Investimentos Transformadores de Eficiência Energética na Indústria”. Assim, sua primeira parte faz referência ao que tem sido feito em termos de gestão estratégica de eficiência energética em diferentes setores industriais por meio de um levantamento da literatura especializada (item 2.1) e de uma visão geral do programa Energy Star (item 2.2), dando maior enfoque aos seus aspectos metodológicos e suas aplicações práticas. Tendo como base esse referencial teórico, o relatório prossegue para o desenho da metodologia de benchmarking energético proposta, a qual é discutida na seção 3. Na seção seguinte, o presente relatório fornece uma aplicação prática dessa metodologia para sua demonstração e validação, através de simulações junto ao setor têxtil e de vestuário, esquadrinhando a sua construção (item 4.1) e seu uso na avaliação de duas instalações industriais (item 4.2). Em seguida, apresenta as principais diretrizes a fim de extrapolar a sua aplicação para outros setores industriais. Finalmente, o relatório traz algumas conclusões a partir da investigação e simulações realizadas.

2. Referenciais Teóricos

Esta seção fornece os principais resultados da consulta dos referenciais teóricos e práticos dedicados a *benchmarks* energéticos industriais, a qual corresponde a tarefa 1, intitulada “Estudos de Metodologias de Benchmark”, no âmbito do *Cluster 3* do referido projeto. Dentro desse contexto, é dado destaque as pesquisas que se mostram relevantes para *benchmarks* energéticos de pequenas e médias empresas dentro do setor industrial, categorizando-as em estudos prévios disponíveis na literatura especializada e em fontes oficiais, representado aqui pelo programa *Energy Star*. Por fim, tais referências são analisadas criticamente lançando luz sobre os seus principais pontos positivos e lacunas.

2.1 Literatura especializada

Tendo em vista que os sistemas de produção industrial são geralmente complexos e distintos entre as instalações industriais, a realização de um benchmarking energético se revela como uma tarefa desafiadora (Andersson et al., 2018). Dentro desse contexto, Tan et al. (2015) fornecem uma metodologia de benchmarking voltada para ambientes de high-mix, low-volume, denominada Energy Efficiency Benchmarking Methodology (E2BM). A E2BM relaciona basicamente o consumo de energia ao fluxo de materiais, abarcando três níveis hierárquicos de uma instalação industrial. Desse



modo, pode ser aplicada em cada um dos seus equipamentos, nos diferentes processos componentes da sua linha de produção e na instalação industrial como um todo. Para sua execução, os autores preveem cinco etapas, são elas: (i) modelagem de fluxos de energia e materiais, (ii) coleta de dados, (iii) definição de indicadores, (iv) benchmarking e análise, e (v) planejamento de melhoria.

Dentro dessa lógica, os autores propõem três indicadores de desempenho energético. O primeiro deles corresponde a intensidade energética que faz referência ao consumo de energia por unidade monetária. O segundo indicador é o consumo específico de energia, o qual é definido como o consumo de energia por volume de produção de uma determinada linha de produção ou unidade funcional de um equipamento. Finalmente, o terceiro indicador correlaciona a eficiência energética com as atividades produtivas e o desempenho econômico (Tan et al., 2015).

Para determinar os indicadores de referência, Tan et al. (2015) indicam que a análise de regressão linear simples é o método mais comumente empregado devido à sua fácil compreensão e simplicidade de aplicação. Em linhas gerais, essa ferramenta analisa a relação linear entre duas variáveis: (i) uma variável dependente – que expressa os dados de consumo de energia –, e (ii) uma variável independente – que afeta (e “explica”) o consumo de energia, denotando o seu fator de influência sobre a variável dependente. Note que tal relação pode ser observada através de um diagrama de dispersão. Assim, é possível definir uma linha de base para o consumo energético; identificar áreas de desperdício e potenciais de economia de energia; e estabelecer as melhores práticas em termos de eficiência energética.

Em Zhang et al. (2016), os autores desenvolvem um sistema de indicadores visando a aplicação de um benchmarking energético dentro do setor de papel na China. Nesse sentido, propõem que os indicadores de desempenho energético sejam organizados segundo uma estrutura hierárquica composta por quatro níveis, quais sejam, (i) nível de integração de dados, (ii) linha de produção, (iii) processo unitário e (iv) equipamento. Nessa estrutura, estabelecem como indicadores o consumo específico de energia térmica e elétrica para os seus níveis mais inferiores, os quais são agregados de modo a expressar o desempenho energético em nível de instalação industrial.

Sob essa perspectiva, os autores destacam a possibilidade de responder questões tanto específicas (em nível de equipamento e processo unitário) quanto gerais (em nível de instalação industrial) sobre eficiência energética, explorando, assim, o potencial de economia de energia. Em outras palavras, a metodologia proposta por eles permite optar entre duas abordagens principais, uma bottom-up (em nível de equipamento e processo unitário) e outra top-down (em nível de instalação industrial). Vale ressaltar que a abordagem bottom-up traz consigo desafios relativos à quantidade de informações requeridas na medida em que uma infinidade de equipamentos compõe geralmente uma instalação industrial (Zhang et al., 2016).

2.2 O programa *Energy Star*

A *Energy Star*¹ corresponde a um programa voluntário de certificação para o consumo eficiente de energia que foi criado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos (EUA) em 1992. De um modo geral, fornece informações simples, confiáveis e imparciais sobre o consumo de energia associadas a produtos e empresas, sobre as quais consumidores e empreendedores orientam as suas decisões (Energy Star, 2021).

No que diz respeito mais especificamente ao setor empresarial, esse programa oferece instrumentos e recursos específicos que auxiliam na gestão estratégica do uso de energia em suas instalações prediais e industriais, permitindo que o setor privado economize energia, atinja metas ambientais, aumente seus lucros e, com isso, se torne mais competitivo (Energy Star, 2021).

Sua ferramenta mais popular, denominada *Energy Performance Indicator* (EPI), fornece uma visão geral do uso de energia de uma determinada instalação industrial, classificando-a em termos de desempenho energético através do cálculo de um *score* (ou pontuação) que varia de 1 a 100. Índices mais altos correspondem a melhores desempenhos energéticos, enquanto que índices mais baixos indicam o contrário (Boyd et al., 2008; Energy Star, 2021).

Essa métrica que se tornou o padrão internacional do setor industrial para avaliação do desempenho energético de suas instalações é baseada em um modelo de regressão linear múltipla que fornece uma previsão do consumo de energia com base em algumas características da instalação industrial, tais como atividades produtivas e qualidade dos seus insumos. Assim, o consumo de energia dessas instalações é confrontado com o consumo previsto por esse modelo de modo a responder ao seu usuário a seguinte questão hipotética: “*Como a minha indústria se compararia a todas as outras do meu setor, se todas elas fossem semelhantes à minha?*” (Boyd et al., 2008; Energy Star, 2021).

2.3 Análise dos principais referenciais teóricos

De acordo com o levantamento dos principais referenciais teóricos e boas práticas relacionadas à um *benchmarking* energético voltado ao setor industrial, a adoção de uma estrutura hierárquica composta por diversos níveis de uma instalação industrial é uma abordagem particularmente interessante. Isso porque é capaz não só de fornecer uma visão abrangente sobre o consumo de energia de uma determinada instalação industrial, mas também refletir características de aspectos mais específicos, como por exemplo, seus processos industriais e seus equipamentos. Na prática, é importante ressaltar, no entanto, que tal abordagem coloca desafios relacionados, sobretudo, a quantidade e especificidade de dados a serem coletados e tratados.

No que diz respeito mais especificamente aos modelos disponíveis para execução de um *benchmarking* energético, à despeito da pluralidade de opções, os modelos de regressão linear se mostram como os mais populares, graças, principalmente, ao seu fácil entendimento e aplicação. Isso inclui os modelos de

¹ Para mais informações, acessar: <https://www.energystar.gov/>.

regressão linear tanto simples – amplamente empregados pela literatura – quanto múltipla – utilizados na ferramenta *EPI* da *Energy Star* (2021).

3. Proposta metodológica

Nesta seção é descrita a metodologia de *benchmarking* energético para indústrias que foi construída à luz das boas práticas de gestão de eficiência energética apresentadas na seção anterior. Assim, propõe-se a adoção de uma abordagem baseada em níveis hierárquicos sobre a qual combinam-se idealmente modelos de regressão linear simples e múltipla. A partir dessa lógica, busca-se criar a estrutura necessária para estabelecer os consumos energéticos de referência, apontar oportunidades de economia de energia de instalações industriais e subsidiar a avaliação dos seus impactos produtivos, financeiros e de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

3.1 Abordagem de níveis hierárquicos

Com base nos referenciais teóricos discutidos na seção anterior, a proposta metodológica de *benchmarking* energético para indústrias adota uma abordagem baseada em níveis hierárquicos que se estende desde os sistemas industriais até a instalação industrial como um todo. A Figura 1 a seguir ilustra essa ideia por meio de uma pirâmide hierárquica dividida em quatro níveis. Nela, é possível verificar que as possibilidades de melhoria em termos de eficiência energética se ampliam na medida em que nos deslocamos em direção aos níveis inferiores da pirâmide. Por outro lado, a quantidade de informação necessária para viabilizar essa melhoria também aumenta, conferindo ao *benchmarking* energético desafios práticos à sua realização.



Figura 1 – Ilustração da abordagem de níveis por meio de uma pirâmide hierárquica

Na Figura 2, pode-se observar um esquema ilustrativo de aplicação dessa abordagem em uma cadeia de valor genérica. Nesse caso, o nível mais inferior diz respeito aos sistemas industriais necessários ao longo da linha de produção de uma instalação industrial, incluindo seus sistemas auxiliares, como por exemplo, os sistemas de iluminação, ar comprimido e condicionamento ambiental. Em seguida, o nível 3 compreende os processos relativos à produção de produtos ou execução de serviços dessa mesma linha de produção, os quais podem ser compostos por um ou mais sistemas relacionados no nível 4 da estrutura hierárquica. No nível 2, os dados situados abaixo da linha de produção são aglutinados para representar o seu desempenho em termos de eficiência energética. Por fim, o nível 1 reúne todas as informações coletadas sobre a instalação industrial de modo a subsidiar a avaliação do seu desempenho em termos de eficiência energética em nível de planta. Ou seja, tal abordagem prevê a agregação das informações de consumo de energia dos elementos das camadas inferiores.

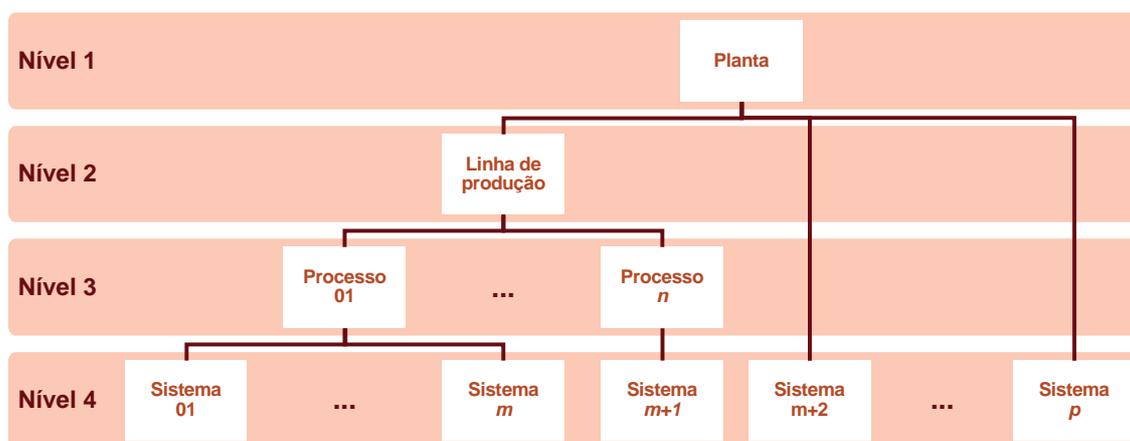


Figura 2 – Ilustração da abordagem de níveis aplicada a uma cadeia de valor genérica

A partir dessa estrutura, indicadores de desempenho energético são selecionados e atribuídos a cada um dos seus elementos, conforme mostrado na Figura 3. Nela, é possível observar indicadores da forma $Ind_{i,j}$ que são associados ao elemento i do nível j da estrutura hierárquica proposta para uma cadeia de valor genérica. Para a presente metodologia de *benchmarking* energético, tais indicadores representam o consumo específico de energia, isto é, a razão entre o consumo de energia e a unidade

de saída de cada um dos elementos; podendo assumir também uma representação em um gráfico *consumo de energia x produção*.

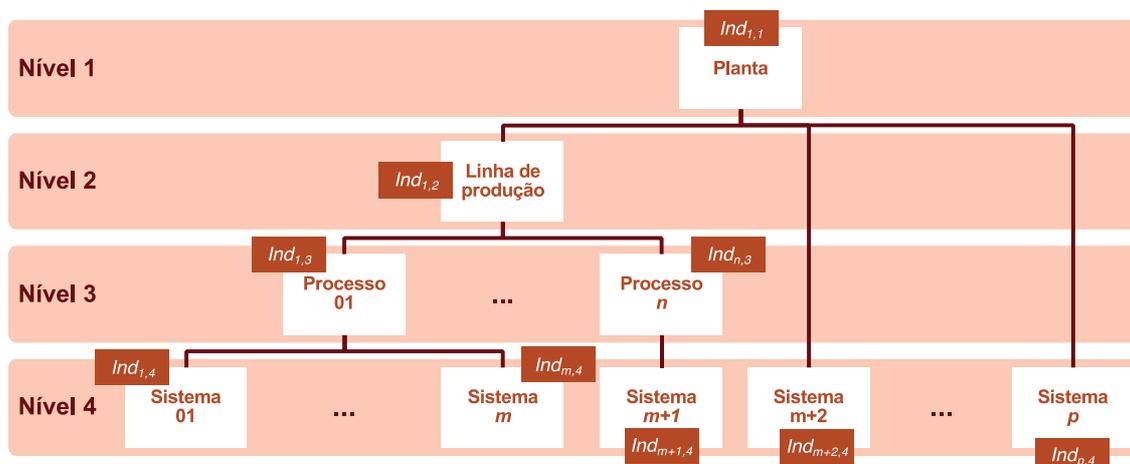


Figura 3 – Ilustração da atribuição de indicadores aos elementos da estrutura em diferentes níveis de uma cadeia de valor genérica

Desse modo, a análise de regressão linear simples é empregada para determinar os indicadores de desempenho energético dos elementos dos níveis 2, 3 e 4. Paralelamente, lança-se mão da análise de regressão linear múltipla para obter o indicador de desempenho energético do nível 1, ou seja, em nível da instalação industrial como um todo, conforme indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Modelos de análise para os indicadores de cada elemento dos diferentes níveis de uma cadeia de valor genérica

Nível	Elemento	Indicador	Modelo de análise
1	Planta	$Ind_{1,1}$	Análise de regressão linear múltipla
2	Linha de produção	$Ind_{1,2}$	Análise de regressão linear múltipla
3	Processo 01	$Ind_{1,3}$	Análise de regressão linear múltipla
3	Processo n	$Ind_{n,3}$	Análise de regressão linear múltipla
4	Sistema 01	$Ind_{1,4}$	Análise de regressão linear simples
4	Sistema m	$Ind_{2m,4}$	Análise de regressão linear simples
4	Sistema $m+1$	$Ind_{m+1,4}$	Análise de regressão linear simples
4	Sistema auxiliar $m+2$	$Ind_{m+2,4}$	Análise de regressão linear simples
4	Sistema auxiliar p	$Ind_{p,4}$	Análise de regressão linear simples

Essa combinação de dois modelos distintos se mostra particularmente interessante para a execução de um *benchmarking* energético para indústrias uma vez que a abordagem em níveis, embora amplie as possibilidades de otimização energética, impõe desafios relacionados à grande especificidade e quantidade de dados envolvidos. Com isso, a adoção de um indicador único (ou *score*) em nível de instalação industrial se caracteriza como um recurso bastante útil para avaliar o seu consumo energético quando os dados necessários aos outros níveis não estão disponíveis com o grau de

detalhamento demandado pela metodologia. Nos itens a seguir, os modelos de regressão linear simples e múltipla serão apresentados.

3.2 Análise de regressão linear simples

Como mencionado anteriormente, os consumos de energia usados como referência do *benchmarking* são determinados segundo um modelo de regressão linear simples (Figura 6). Desse modelo resulta a linha de base que representa o consumo de energia do universo do *benchmarking*, cuja equação segue o modelo genérico apresentado pela Equação 1.

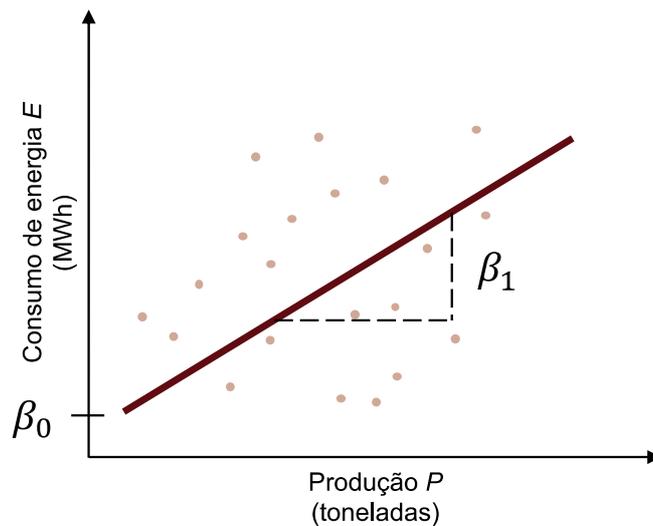


Figura 4 – Ilustração de uma regressão linear simples aplicada à variável dependente de consumo de energia E e a variável independente de volume de produção P

(Nota: os pontos em vermelho claro correspondem às informações de consumo de energia e volume de produção coletadas a partir de diversas instalações industriais, podendo, assim, representar qualquer um dos elementos da estrutura em diferentes níveis apresentados na Figura 2).

$$E = \beta_0 + P \times \beta_1 \quad (1)$$

Onde,

E corresponde a variável dependente de consumo de energia (em MWh);

β_0 corresponde ao consumo de energia de base, que não representa o consumo de energia da linha de produção (em MWh);

P corresponde a variável independente de volume de produção (em toneladas);

β_1 corresponde ao coeficiente angular que representa o consumo de energia específico incremental.

Para obtenção da equação da linha de regressão linear, são necessários a seleção e o emprego de variáveis quantitativas e estatisticamente representativas dentro da amostra considerada. Nesta metodologia de *benchmarking* energético, tais variáveis correspondem aos consumos de energia dos elementos da estrutura hierárquica, conforme relacionado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Algumas variáveis que podem alimentar o modelo de regressão linear simples

Nível	Elemento	Variável independente	Unidade
4	Sistema de processo industrial	Consumo de energia elétrica	MWh
4	Sistema auxiliar	Consumo de energia elétrica	MWh

Como resultado, o modelo de regressão linear simples fornecerá a situação dos elementos de uma determinada instalação industrial com relação ao banco de dados do *benchmarking* energético, conforme ilustrado na Figura 5. Sabendo que alguns elementos consumirão mais (quadrado vermelho) e outros menos (triângulo vermelho) energia do que o previsto por esse modelo, é possível, portanto, avaliar os seus desempenhos em termos de eficiência energética. Assim, o quadrado vermelho pode representar um dos elementos da estrutura em diferentes níveis da Figura 2, que apresenta um desempenho baixo (ou ruim) em eficiência energética com relação aos dados do *benchmarking*. Por outro lado, o elemento representado pelo triângulo vermelho apresenta um desempenho alto (ou bom) em termos de eficiência energética.

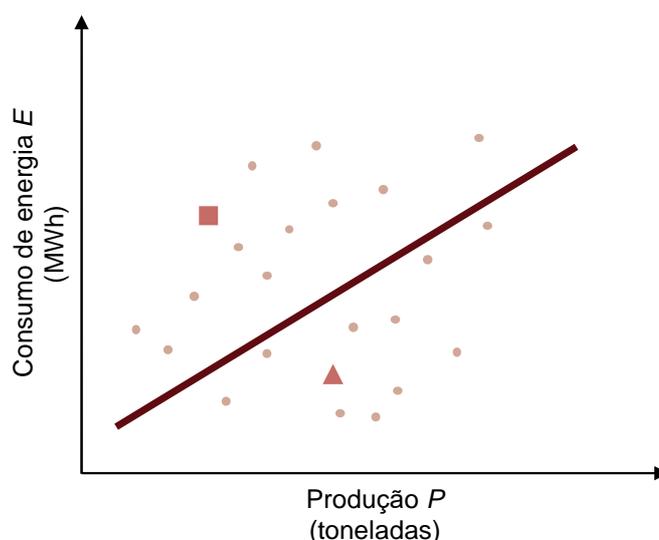


Figura 5 – Ilustração da aplicação da análise de regressão linear simples no *benchmarking* energético

3.3 Análise de regressão linear múltipla

Analogamente ao modelo de regressão linear simples, análises de regressão linear múltipla são empregadas para determinar os consumos de energia usados como referência do *benchmarking* energético. Dessa vez, no entanto, o modelo envolve diversas variáveis explicativas que afetam o consumo de energia de uma instalação industrial e pode ser representado pela Equação 2.

$$E = \beta_0 + X_1 \times \beta_1 + X_2 \times \beta_2 + \dots + X_n \times \beta_n \quad (2)$$

Onde,

E corresponde a variável dependente de consumo de energia (em MWh);

β_0 corresponde ao consumo de energia de base que não representa o consumo de energia da linha de produção (em MWh);

X_1, X_2, \dots, X_n correspondem às variáveis independentes que explicam a variável dependente (em unidades diversas);

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ correspondem aos coeficientes angulares.

A determinação dessa equação requer a identificação das variáveis que afetam o consumo de energia de uma instalação industrial, as quais podem incluir clima, estações, ciclos de negócios, entre outras. Para esta metodologia de *benchmarking* energético, a Tabela 3.3 lista algumas variáveis quantitativas que podem *a priori* alimentar o modelo de regressão linear múltipla. Vale ressaltar que esse conjunto pode ser eventualmente complementado com outras variáveis que representam características específicas de determinados setores industriais.

Tabela 3.3 – Algumas variáveis quantitativas que podem alimentar o modelo de regressão linear múltipla

Variável independente	Unidade
Produção total	Toneladas
Número de empregados	Unidades de empregados
Período de operação	Horas
Zona climática	°C

Além dessas variáveis quantitativas, existem outras variáveis de caráter qualitativo que podem influenciar no consumo de energia de uma instalação industrial. Esse é o caso, por exemplo, do tipo de segmento e porte da instalação industrial, produto fabricado ou serviço ofertado e sistema industrial analisado. Tais informações podem ser representadas em um modelo de regressão linear múltipla através de variáveis binárias (ou *dummy*), as quais vão informar se um elemento pertence ou não a um conjunto, atribuindo-lhes os valores de 1 e 0, respectivamente (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Algumas variáveis qualitativas que podem alimentar o modelo de regressão linear múltipla

Variável independente	Valores assumidos
Processo ou serviço	1 (pertence) ou 0 (não pertence)
Sistema industrial	1 (pertence) ou 0 (não pertence)

Assim, o modelo de regressão linear múltipla é capaz de classificar uma determinada instalação industrial com relação à outras instalações dentro do *benchmarking* energético, permitindo a avaliação do seu desempenho. Para essa mesma instalação industrial, tal modelo pode ainda fornecer um *score* (ou pontuação)

relativo ao seu desempenho energético, conforme realizado pelo programa *Energy Star* (2021). Isso requer um ajuste do modelo de regressão linear múltipla de modo a construir uma curva de distribuição cumulativa dos dados, a qual pode ser obtida através de uma distribuição gama.

Na Figura 6, pode-se observar um exemplo dessa curva onde a instalação industrial avaliada, que possui um consumo de energia de 450 MWh (linha vertical), obtém um *score* de 33 (linha horizontal). Isso significa que se todas as instalações industriais dentro do *benchmarking* fossem semelhantes a instalação industrial avaliada, cerca de 67% dessa população apresentaria um consumo igual ou menor ao dela.

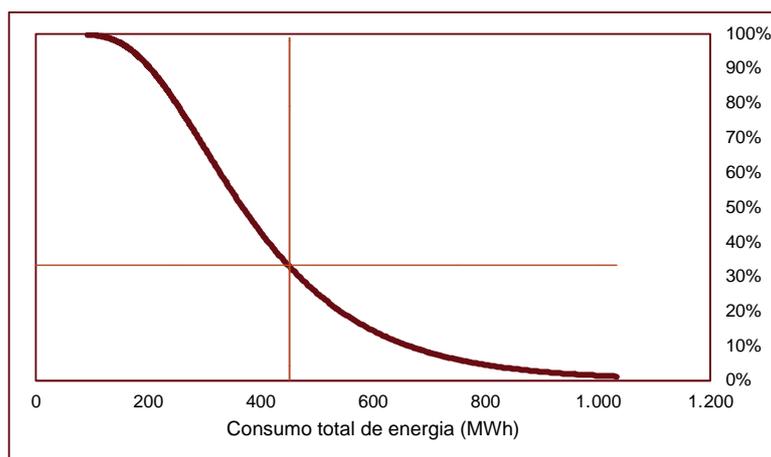


Figura 6 – Ilustração da aplicação da análise de regressão linear múltipla no benchmarking energético

3.4 Regras estatísticas para o modelo de *benchmarking*

Para avaliar a significância estatística das regressões lineares desenvolvidas para o modelo de *benchmarking*, dever-se-á observar simultaneamente o comportamento de três parâmetros estatísticos apresentados a seguir. Esta análise de significância estatística está de acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (EVO, 2019) e deverá ser executada toda vez que novos projetos forem inseridos na base de dados, sejam estes dos setores industriais estudados ou de novos setores que serão introduzidos pelo PotencializEE.

a) Estatística-t

Uma vez que um coeficiente de modelo de regressão (a) é uma estimativa estatística da verdadeira relação entre uma variável individual X e Y , este coeficiente está sujeito a variação. A precisão da estimativa é medida pelo erro padrão do coeficiente e o valor associado da *estatística-t*. A *estatística-t* é um teste estatístico para determinar se uma estimativa tem significância estatística.

O erro padrão de cada coeficiente é calculado conforme a Equação (3). A seguinte equação se aplica ao caso de uma variável independente.

$$s(a) = \sqrt{\frac{\sum(Y_L - \hat{Y}_i)^2 / (n - 2)}{\sum(X_i - \bar{X})^2}} \quad (3)$$

O intervalo dentro do qual o valor verdadeiro do coeficiente (a) é encontrado é apresentado na Equação (4). Onde t é o valor obtido da *estatística-t* apresentada na Tabela 3.5:

$$a \pm t \cdot s(a) \quad (4)$$

O erro padrão do coeficiente (a) também leva ao cálculo da *estatística-t*. Este teste, em última análise, determina se o coeficiente calculado é estatisticamente significativo. O teste t é calculado usando a Equação (5) a seguir:

$$t\text{-estatística} = a/s(a) \quad (5)$$

Como pode ser visto na primeira coluna da Tabela 3.5, para que a o coeficiente (a) tenha significância estatística em um nível de confiança de 95%, a *estatística-t* deverá ser maior ou igual a 2.

Tabela 3.5 – Valores da *estatística-t* para diferentes níveis de confiança

Graus de liberdade (GL) Degrees of Freedom (DF)	Nível de confiança			
	95%	90%	80%	50%
1	12,71	6,31	3,08	1,00
2	4,30	2,92	1,89	0,82
3	3,18	2,35	1,64	0,76
4	2,78	2,13	1,53	0,74
5	2,57	2,02	1,48	0,73
6	2,45	1,94	1,44	0,72
7	2,36	1,89	1,41	0,71
8	2,31	1,86	1,40	0,71
9	2,26	1,83	1,38	0,70
10	2,23	1,81	1,37	0,70
11	2,20	1,80	1,36	0,70
12	2,18	1,78	1,36	0,70
13	2,16	1,77	1,35	0,69
14	2,14	1,76	1,35	0,69
15	2,13	1,75	1,34	0,69
16	2,12	1,75	1,34	0,69
17	2,11	1,74	1,33	0,69
18	2,10	1,73	1,33	0,69
19	2,09	1,73	1,33	0,69
21	2,08	1,72	1,32	0,69
23	2,07	1,71	1,32	0,69
25	2,06	1,71	1,32	0,68
27	2,05	1,70	1,31	0,68
31	2,04	1,70	1,31	0,68

35	2,03	1,69	1,31	0,68
41	2,02	1,68	1,30	0,68
49	2,01	1,68	1,30	0,68
60	2,00	1,67	1,30	0,68
120	1,98	1,66	1,29	0,68
∞	1,96	1,64	1,28	0,67

b) Coeficiente de determinação R^2

O primeiro passo para avaliar a precisão de um modelo é examinar o coeficiente de determinação, R^2 , uma medida da extensão em que as variações na variável dependente Y são explicadas pelo modelo de regressão. Matematicamente, R^2 é dada pela Equação 6 a seguir:

$$R^2 = \frac{\text{Variação Explicada em } Y}{\text{Variação Total em } Y} \quad (6)$$

O intervalo de valores possíveis para R^2 é de 0,0 a 1,0. Um R^2 igual a 0,0 significa que nenhuma das variações é explicada pelo modelo, portanto, o modelo não fornece orientação para entender as variações em Y (ou seja, as variáveis independentes selecionadas não explicam as causas das variações observadas em Y). Por outro lado, um R^2 igual a 1,0 significa que o modelo explica 100% das variações em Y , (ou seja, o modelo prevê Y com total certeza, para qualquer conjunto de valores da(s) variável(is) independente(s)).

Em geral, quanto maior o coeficiente de determinação, melhor o modelo descreve a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente. Alguns guias da indústria sugerem 0,75 como ponto de corte, mas não existe um padrão universal para um valor mínimo aceitável de R^2 , pois é altamente dependente do contexto.

No caso do modelo de *benchmarking*, estamos recomendando ponto de corte de R^2 inicialmente em 0,70 para os dados estudados a partir de projetos cujos levantamento não tinham a finalidade de benchmarking. O corte do R^2 deverá ser elevado à medida que se tenham dados reais do projeto PotencializEE disponíveis para aplicação no modelo de benchmarking. Nestas condições, recomendamos que o corte do R^2 seja elevado para no mínimo 0,75.

c) Coeficiente de Variação (CV)

Quando um modelo é usado para prever um valor de energia (Y) para determinadas variáveis independentes, a precisão da previsão é medida pelo erro padrão da estimativa ($s(\hat{Y})$). Este erro de precisão também é conhecido por alguns outros nomes, como erro padrão da regressão e erro médio quadrático ajustado para graus de liberdade. Na modelagem de regressão, a melhor estatística de erro único a ser observada é o erro padrão da estimativa de regressão, que está diretamente relacionado às variações inexplicáveis na variável dependente (Y).

Uma vez que o(s) valor(es) da(s) variável(is) explicativa(s) são inseridos no modelo de regressão para estimar um valor de energia (\hat{Y}), uma aproximação do intervalo de valores possíveis para \hat{Y} pode ser calculado usando a Equação 7:

$$\hat{Y} \pm t \cdot s(\hat{Y}) \quad (6)$$

Onde,

\hat{Y} é o valor previsto de energia (Y) do modelo de regressão, para uma variável independente ou combinação de variáveis independentes;

t é o valor obtido das tabelas t (ver Tabela 3.5).

Conforme descrito anteriormente, o erro padrão da estimativa $s(\hat{Y})$ é calculado como apresentado na Equação 8:

$$s(\hat{Y}) = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n - k - 1}} \quad (7)$$

Nesta equação, k é o número de variáveis explicativas na equação de regressão. Novamente, este erro é conhecido como erro médio quadrático médio (*root mean square error – RMSE*). O *RMSE* é uma equação quadrática que mede a magnitude média do erro. As diferenças entre os valores estimados e observados são elevadas ao quadrado e então calculada a média sobre a amostra. A raiz quadrada da média é obtida. O *RMSE* dá um peso relativamente alto para erros grandes. Dividir o *RMSE* pelo uso médio de energia produz o coeficiente de variação do *RMSE*, ou o CV (*RMSE*), conforme mostrado na Equação 9:

$$CV(RSME) = \frac{s(\hat{Y})}{\bar{Y}} \quad (9)$$

Recomendamos que o modelo seja rejeitado se o CV for maior que 20%.

d) Conclusão

Para que o modelo seja aprovado as três regras estatísticas apresentadas na

Tabela 3.6, deverão ser atendidas simultaneamente. Caso contrário a regressão deverá ser rejeitada para fins de cálculo de benchmarking e respectivas metas alvo (targets). Em caso de rejeição do modelo a recomendação é que mais projetos componham a base de dados de benchmarking até que seja verificado o atendimento às regras estatística e o modelo possa ser aprovado.

Tabela 3.6 – Critérios estatísticos mínimos para aprovação do modelo de regressão linear

Estadística-t	Coefficiente de Determinação (R^2)*	Coefficiente de Variação da Raiz do Erro Médio Quadrático (CV)
> 2	>= 0,70 (70%)	=< 0,20 (20%)

(*) Ver recomendação para elevar o limite do R^2 para >= 0,75.

3.5 Cálculo da estimativa de investimento

No que diz respeito à análise dos aspectos financeiros, propõe-se medir o grau de investimento relativo às ações de eficiência energética em função do valor médio de investimento dos projetos disponíveis na base de dados do *benchmarking*, conforme indicado na Equação (8). Nesse cálculo, é necessário levar em consideração algumas premissas, tais como uma vida útil para o investimento igual a 10 anos e uma taxa de desconto equivalente a 8% a.a. – a mesma utilizada pelo Programa de Eficiência Energética (PEE) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na expansão do setor de energia no país.

$$\text{Média do investimento por economia (R\$/MWh)} = \frac{\text{Média do investimento (R\$)}}{\text{Média da economia (MWh)}} \quad (8)$$

Note que estimar esse investimento por economia de energia em todos os níveis da estrutura hierárquica aqui proposta vai depender da disponibilidade de informações tanto do investimento quanto da economia de energia referentes às ações de eficiência energética de determinado setor industrial no banco de dados do *benchmarking*.

4. Validação da proposta metodológica

Nesta seção, a metodologia proposta para *benchmarking* energético de indústrias é testada dentro do setor têxtil e de vestuário com o intuito de fornecer uma demonstração de sua aplicação e validá-la. Nesse sentido, foram conduzidas simulações utilizando dados estimados com base no banco de dados do PROCEL Indústria de modo a viabilizar a especificação do desempenho em termos de eficiência energética de sistemas industriais, linha de produção e da instalação industrial como um todo. Essas simulações estão divididas em duas partes principais, sendo elas (i) construção do *benchmarking* e (ii) aplicação do *benchmarking*.

4.1 Construção do *benchmarking* para o setor têxtil e de vestuário

A construção do *benchmarking* corresponde ao levantamento e organização de dados relacionados ao consumo de energia de instalações industriais de modo a desenvolver perfis de desempenho energético segundo suas principais características. No caso do setor têxtil e de vestuário, essa atividade teve como ponto partida a determinação de uma cadeia de valor padrão. Tendo como base o relatório “Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Setor têxtil”, produzido pela

Confederação Nacional da Indústria (CNI), em parceria com o PROCEL e a Eletrobras (CNI et al., 2010), foram definidos como processos componentes dessa cadeia: produção de fios, produção de tecidos, produção de malhas, beneficiamento e produção de confecções, conforme ilustrado na Figura 7.

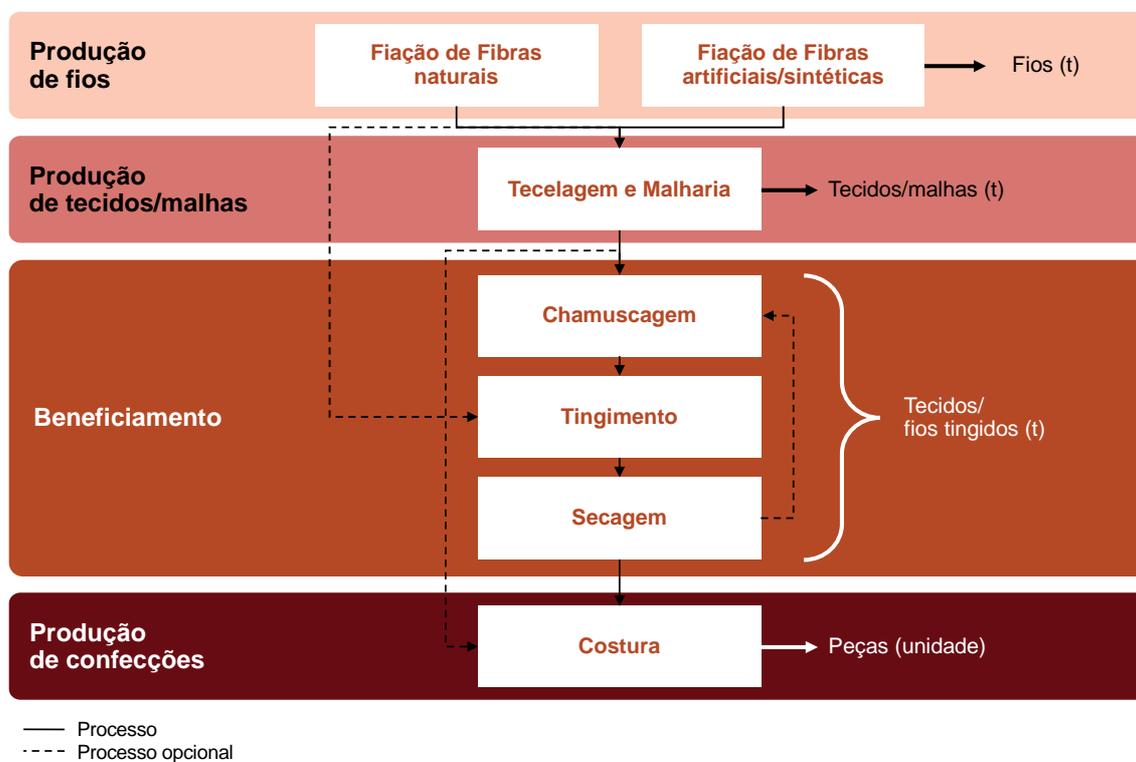


Figura 7 – Cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário considerada para aplicação da metodologia de benchmarking energético

Fonte: Adaptado de CNI et al. (2010)

Em seguida, essa cadeia de valor foi organizada sob a forma de uma estrutura hierárquica, como pode ser observado na Figura 8. Com base no relatório da CNI (CNI et al., 2010) e no banco de dados do PROCEL Indústria, foram definidos os sistemas industriais necessários ao longo da linha de produção do setor têxtil e de vestuário, ou seja, os elementos do nível 4 da estrutura hierárquica, são eles: sistemas motrizes, sistemas de distribuição e sistemas térmicos. Além deles, foram definidos também sistemas auxiliares de iluminação, condicionamento ambiental e ar comprimido.

Antes de prosseguir, é importante citar que o banco de dados do PROCEL Indústria não relaciona dados sobre o consumo de energia dos sistemas de iluminação para o serviço de beneficiamento, nem o consumo de energia dos sistemas de condicionamento ambiental para todo o setor têxtil e de vestuário. Desse modo, foram realizadas estimativas complementares com o intuito de considerar tais consumos e tornar a as simulações mais realistas. Para isso, foi considerado que o consumo de energia elétrica dos sistemas de iluminação relacionado ao serviço de beneficiamento corresponde a 5% do seu consumo total de energia. Paralelamente, assumiu-se que o consumo de energia elétrica dos sistemas de condicionamento ambiental do setor têxtil e de vestuário equivale a 15% do seu consumo total de energia (CNI et al., 2010).

Voltando à estrutura hierárquica estabelecida para o setor têxtil e de vestuário, o seu nível 3 faz referência aos processos de produção ou serviço da sua linha de



produção, quais sejam, (i) produção de fios, (ii) produção de tecidos, (iii) produção de malhas, (iv) beneficiamento e (v) produção de confecções. No nível 2, os dados abaixo da linha de produção são combinados de modo a representar esse elemento. Finalmente, o nível 1 agrega todos os dados coletados sobre a instalação industrial. A Figura 8 ilustra a estrutura hierárquica resultante para a cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário e traz ainda os indicadores de desempenho energético de cada um dos seus elementos.

Após a definição da estrutura hierárquica, estimaram-se a produção e o consumo de energia para cada sistema de 12 instalações industriais representantes de cada um dos cinco processos componentes da cadeia definida para o setor têxtil e de vestuário, perfazendo um total de 60 instalações industriais. Nesse processo, adotaram-se algumas premissas. A primeira delas corresponde à base de cálculo dessas estimativas, que consistiu nos valores médios de produção e consumo de energia do setor têxtil e de vestuário disponíveis no banco de dados do PROCEL Indústria (Tabela 4.1). Vale mencionar que essa coleção de dados reúne informações sobre consumo de energia de instalações industriais antes e depois de ações de eficiência energética, referidos como *consumo* V_0 e *consumo* V_1 , respectivamente.

A partir desses dados, foram aplicados fatores multiplicativos aleatórios visando criar uma amostra diversificada, com instalações industriais apresentando diferentes perfis de consumo e, conseqüentemente, diferentes desempenhos em termos de eficiência energética. A Figura 8 relaciona as principais informações sobre a produção e o consumo de energia adotadas na simulação da metodologia de *benchmarking* energético dentro do setor têxtil e de vestuário.

A seguir, o desenvolvimento do *benchmarking* energético é detalhado em cada um dos níveis da estrutura hierárquica proposta para o setor têxtil e de vestuário, começando pelo nível 4.

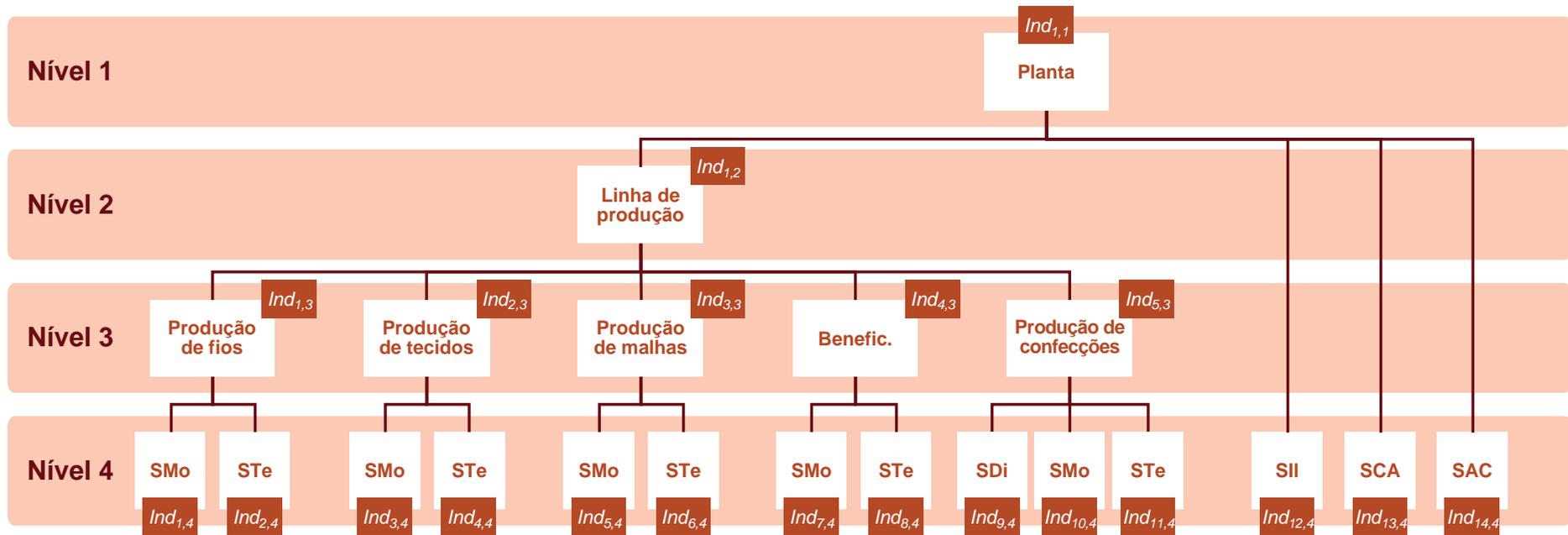


Figura 8 – Atribuição de indicadores aos elementos da estrutura em diferentes níveis da cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SDi: Sistemas de distribuição; SMo: Sistemas motrizes; STe: Sistemas térmicos; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido).

Tabela 4.1 – Dados base para estimação da produção e consumo de energia das 60 instalações industriais utilizadas nas simulações da metodologia de *benchmarking* para o setor têxtil

Processo/ Sistema	Produção média	Consumo médio V_0 (MWh/ano)	Consumo médio V_1 (MWh/ano)	Cons. esp. médio V_0 (MWh/t ou peça)	Cons. esp. médio V_1 (MWh/t ou peça)
Produção de fios					
Sist. de ar comprimido	3.122,98	280,26	224,36	0,09	0,07
Sist. de iluminação	695,16	4,82	3,80	0,01	0,01
Sist. motrizes	902,82	635,90	506,59	0,70	0,56
Sist. térmicos	3.127,31	543,74	405,01	0,17	0,13
Produção de tecidos/malhas					
Sist. de ar comprimido	3.073,48	203,77	178,00	0,07	0,06
Sist. de iluminação	2.964,71	60,00	29,75	0,02	0,01
Sist. motrizes	3.767,25	433,78	366,39	0,12	0,10
Sist. térmicos	2.964,71	1.315,70	1.279,00	0,44	0,43
Beneficiamento					
Sist. de ar comprimido	5.397,16	229,31	226,41	0,04	0,04
Sist. motrizes	13.341,39	272,59	216,51	0,02	0,02
Sist. térmicos	5.397,16	512,37	121,99	0,09	0,02
Produção de confecções					
Sist. de ar comprimido	4.052.312,50	171,37	139,26	$4,23 \times 10^{-5}$	$3,44 \times 10^{-5}$
Sist. de distribuição	24.581.100,00	177,50	170,69	$7,22 \times 10^{-6}$	$6,94 \times 10^{-6}$
Sist. de iluminação	7.213.050,00	31,11	15,85	$4,31 \times 10^{-6}$	$2,20 \times 10^{-6}$
Sist. motrizes	2.379.700,00	13,77	1,40	$5,79 \times 10^{-6}$	$5,88 \times 10^{-7}$
Sist. térmicos	591.400,00	13,65	11,65	$2,31 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-5}$

4.1.1 Nível 4: Sistemas industriais

Conforme prevê a metodologia de *benchmarking* energético proposta, no nível 4 da estrutura hierárquica, adota-se um modelo de regressão linear simples, no qual a variável dependente de consumo de energia (tanto V_0 quanto V_1) é explicada pela variável independente de produção. Em linhas gerais, isso permite a obtenção de duas retas que resumem os dados do universo do *benchmarking*, o que possibilita realizar previsões de consumo de energia de instalações industriais em função da sua produção. A seguir, as retas de regressão linear de cada um dos sistemas industriais considerados para o setor têxtil e de vestuário são apresentadas tanto na forma gráfica quanto na forma de equação. Vale mencionar que os elementos de cor mais clara dos gráficos representam os dados de *consumo* V_0 , quanto que os elementos de cor mais escura, os dados de *consumo* V_1 .

a) Sistemas de processos industriais

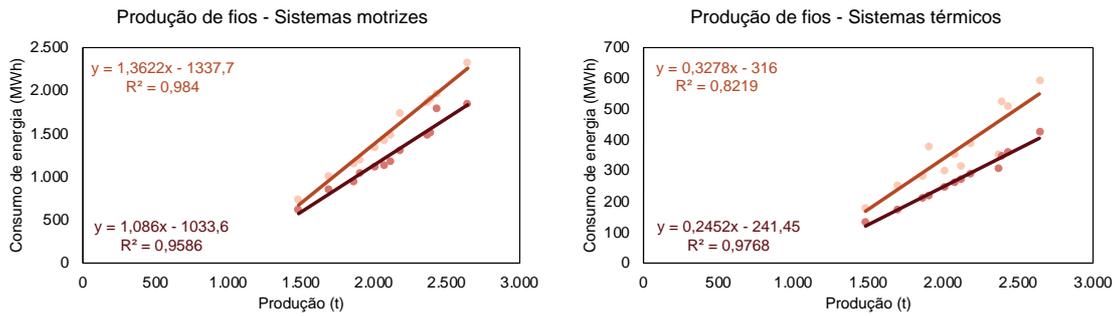


Figura 9 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de fios do setor de têxtil e de vestuário

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto que elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

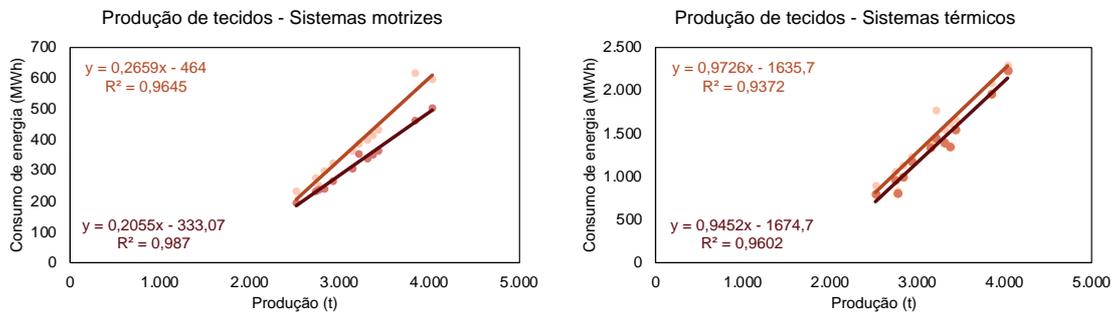


Figura 10 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de tecidos do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto que elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

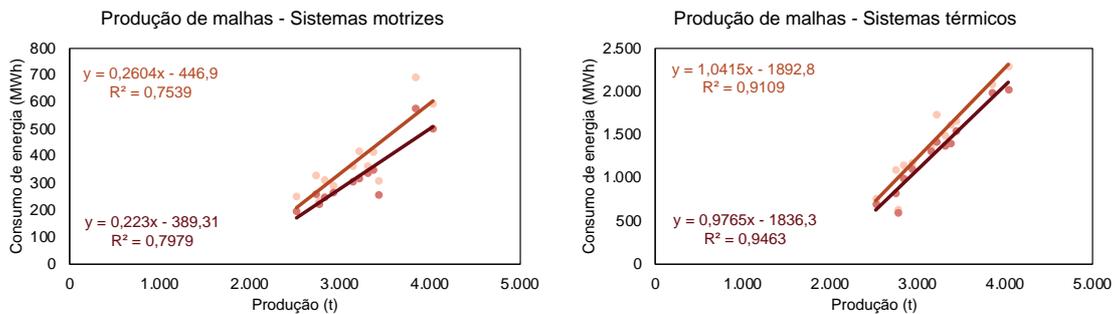


Figura 11 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de malhas do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

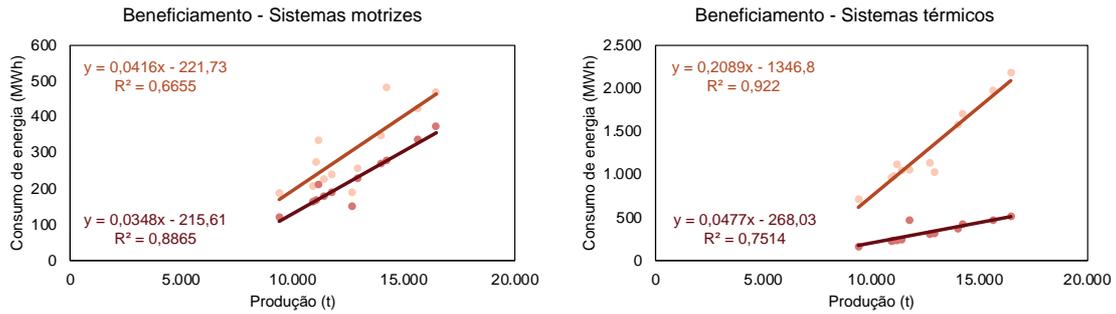


Figura 12 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas do beneficiamento do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

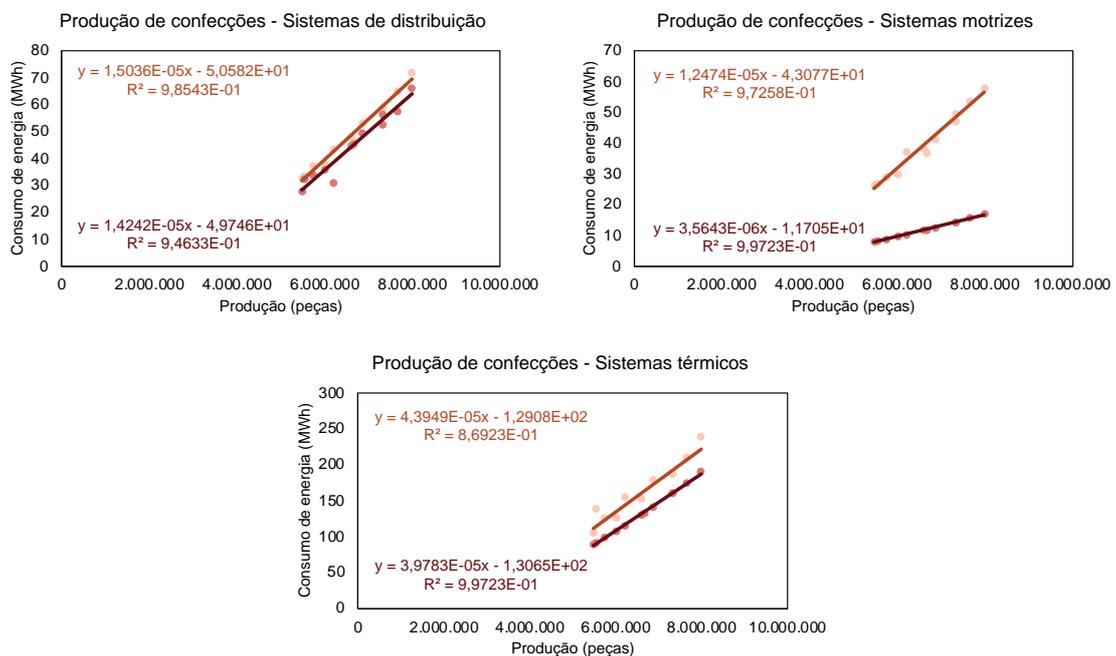


Figura 13 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas da produção de confecções do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

b) Sistemas auxiliares

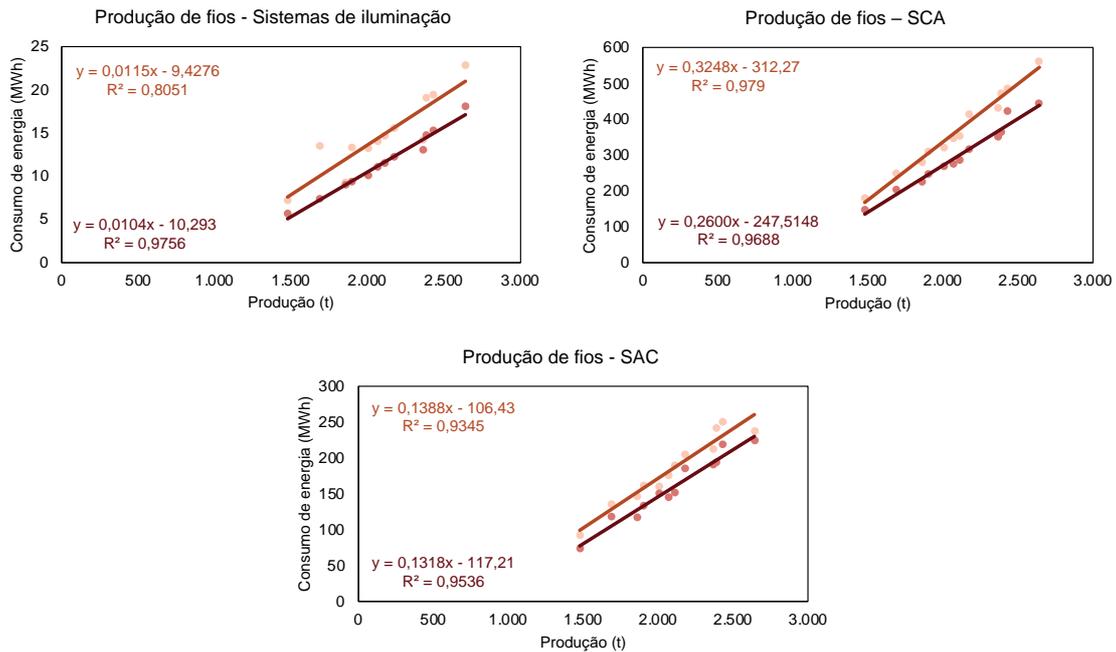


Figura 14 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de fios do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1)

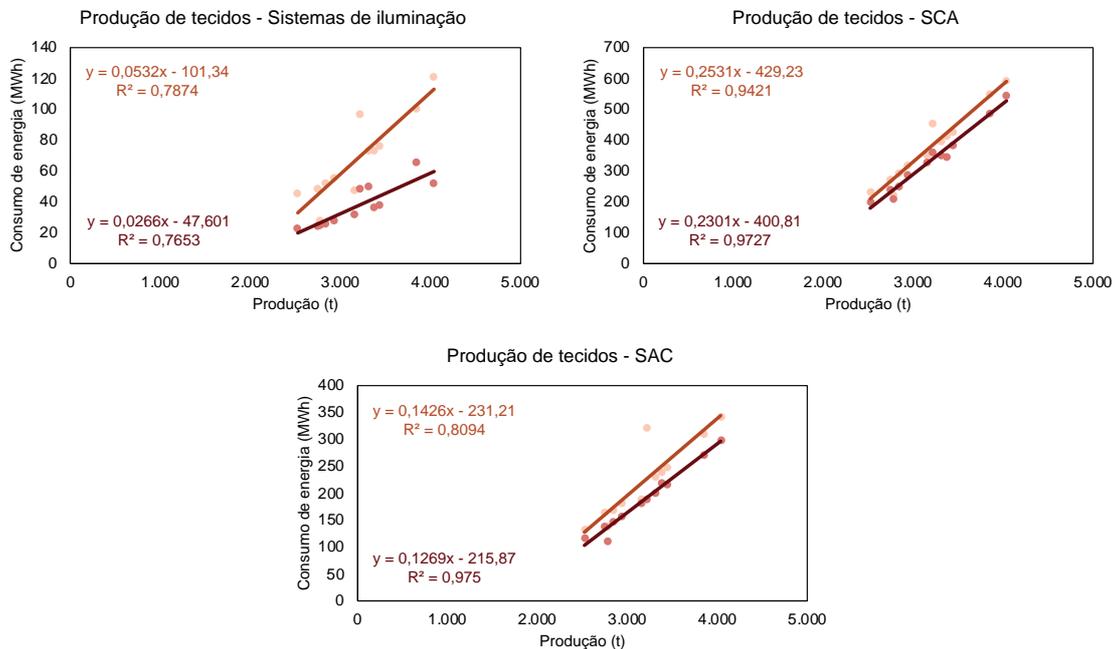


Figura 15 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de tecidos do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1)

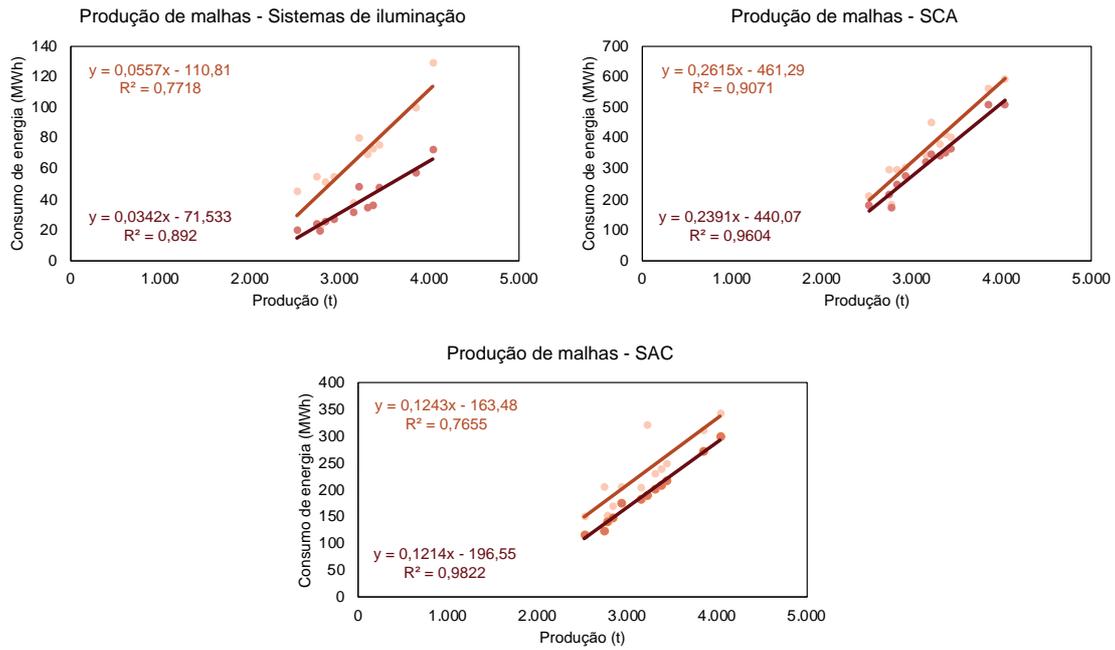


Figura 16 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de malhas do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1)

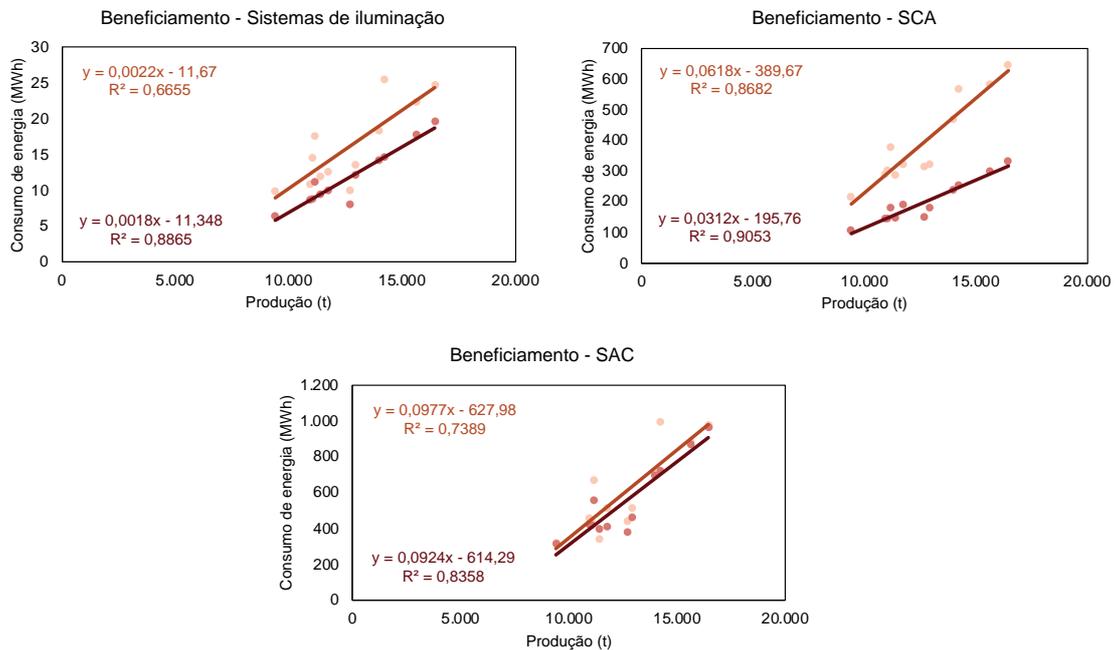


Figura 17 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados ao beneficiamento do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1)

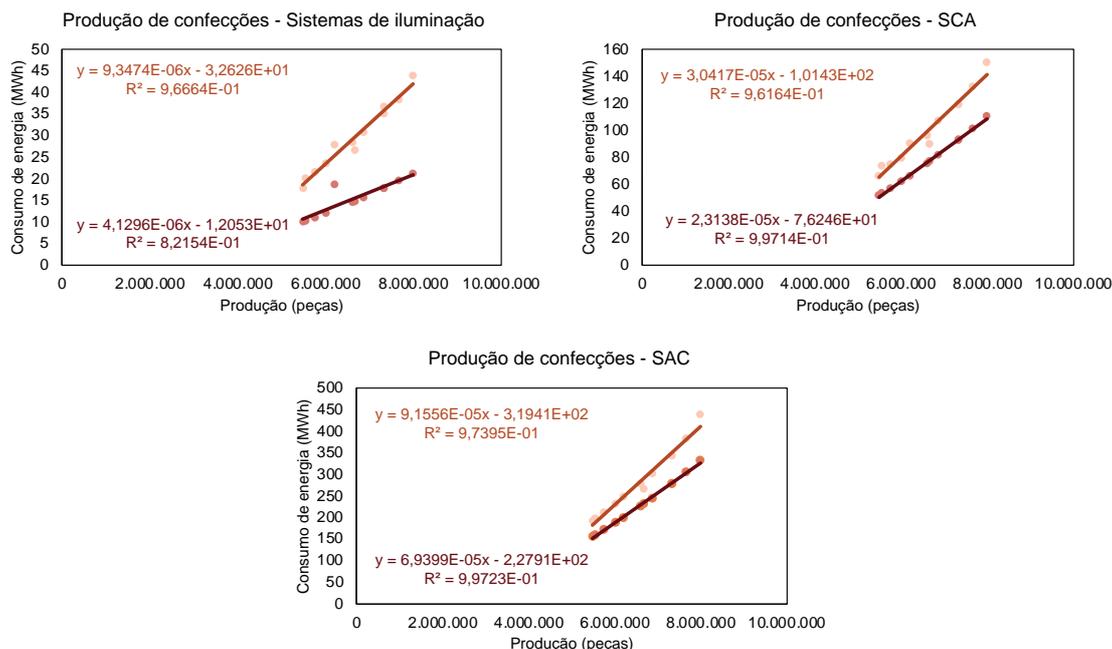


Figura 18 – Resultado da análise de regressão linear simples para os sistemas auxiliares associados à produção de confecções do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1)

4.1.2 Nível 3: Processos

Embora metodologia de *benchmarking* energético proposta estabeleça a aplicação de um modelo de regressão linear múltipla para os elementos acima do nível 4 da estrutura hierárquica, tal procedimento não é capaz de obter o resultado esperado quando aplicado no nível 3 com os dados utilizados nas presentes simulações. Isso porque tais dados mantiveram o padrão das informações contidas no banco de dados do PROCEL Indústria, no qual todas as instalações industriais de um mesmo segmento apresentam os mesmos sistemas industriais. Em decorrência disso, as variáveis qualitativas referentes a esses sistemas não influenciam o consumo final de energia e, portanto, não conseguem explicar a variação desse consumo entre as diferentes instalações industriais uma vez que estão presentes em todas elas. Como resultado, o modelo de regressão linear múltipla atribuído ao nível 3 da estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário se transforma em um modelo de regressão linear simples, onde apenas a produção influencia e consegue explicar o consumo final de energia.

Diante desse cenário, as simulações de validação da metodologia de *benchmarking* energético levaram em conta um modelo de regressão linear simples para o nível 3 da estrutura hierárquica, referente aos processos industriais. No entanto, é importante destacar que a aplicação de um modelo de regressão linear múltipla para os elementos acima do nível 4 permanece como orientação da metodologia proposta. A seguir, são apresentados os gráficos de regressão linear de cada processo industrial do setor têxtil e de vestuário, onde os elementos de cor mais clara dos gráficos representam os dados de *consumo* V_0 , quanto que os elementos de cor mais escura, os dados de *consumo* V_1 (Figura 19).

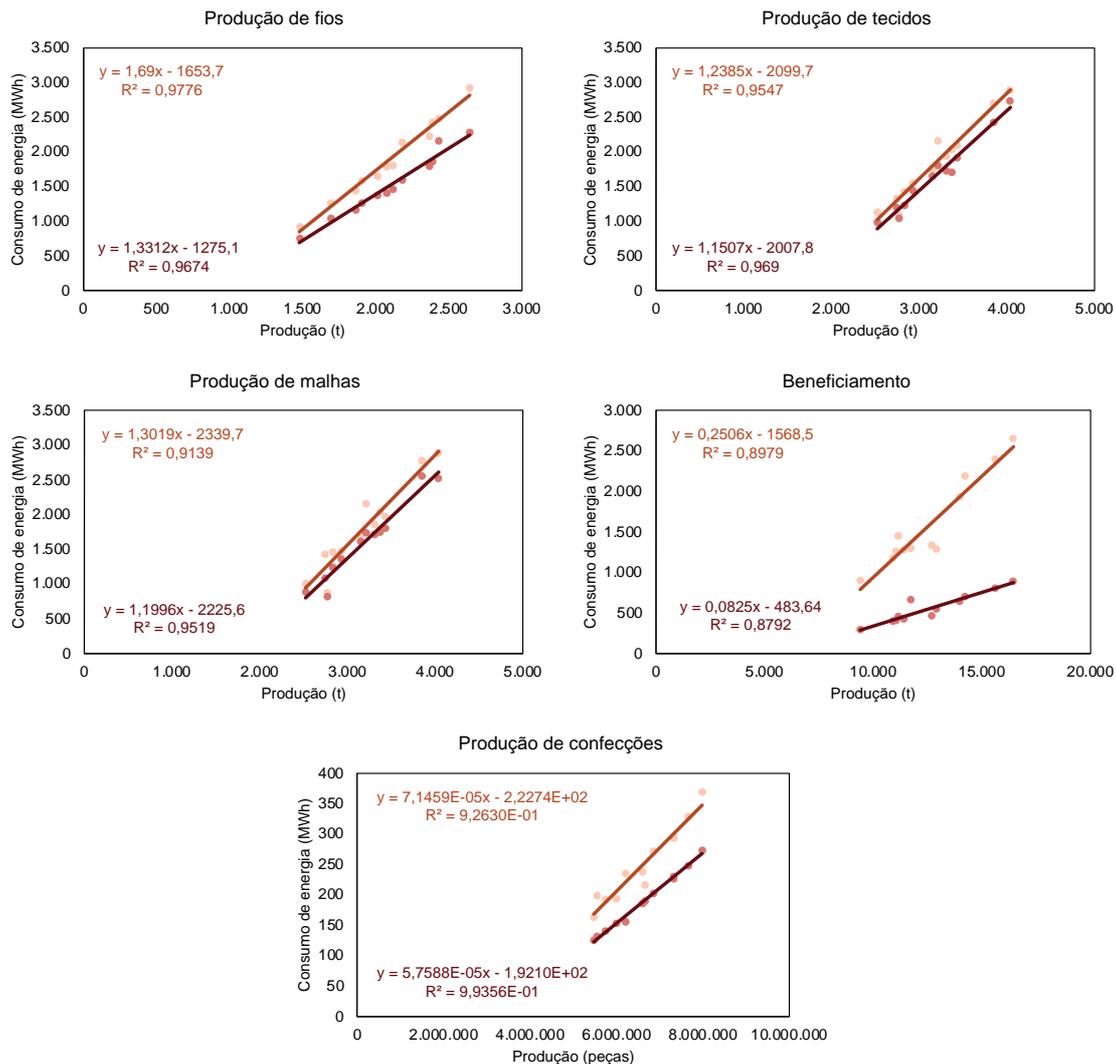


Figura 19 – Resultado da análise de regressão linear simples para a produção de fios, produção de tecidos, produção de malhas, beneficiamento e produção de confecções do setor têxtil e de vestuário (Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1)

4.1.3 Nível 2: Linha de produção

No que diz respeito ao nível 2 da estrutura hierárquica, a metodologia de *benchmarking* energético proposta prevê também a aplicação de um modelo de regressão múltipla em seus elementos. Nesse caso, tal procedimento obtém êxito, mesmo diante do fato dos sistemas motrizes e térmicos serem contemplados por todas as instalações industriais presentes nas simulações. Isso é possível porque as mesmas instalações industriais apresentam diferenças em termos dos processos industriais que elas contemplam (produção de fios, produção de tecidos, produção de tecidos, beneficiamento e produção de confecções), que se tornam variáveis independentes juntamente com a variável de produção, as quais, por sua vez, são capazes de explicar a variação no consumo final de energia em toda a população do *benchmarking*. A Tabela 4.2 relaciona os coeficientes com as variáveis consideradas no modelo de regressão linear múltipla.

Tabela 4.2 – Informações sobre o modelo de regressão linear múltipla para o nível 2 da estrutura hierárquica do setor têxtil e de vestuário

Nível 2: Linha de Produção		
Variáveis		Coefficientes
Constante		1885,086408
Produção		7,40184x10 ⁻⁵
Nível 3 Processos industriais	Produção de fios	0
	Produção de tecidos	-44,42554111
	Produção de malhas	-82,59301247
	Beneficiamento	-288,9661366
	Produção de confecções	-2124,768996
Nível 4 Sistemas de processos industriais	Sistemas de distribuição	0
	Sistemas motrizes	0
	Sistemas térmicos	0

A Equação (9) abaixo representa o modelo de regressão linear múltipla da linha de produção do *benchmarking* energético para o setor têxtil e de vestuário.

$$E = 1.885,09 + 7,40 \times 10^{-5} \times X_P - 44,43 \times X_{P_{Te}} - 82,59 \times X_{P_{Ma}} - 288,97 \times X_{S_{Be}} - 2.124,77 \times X_{P_{Co}} \quad (9)$$

Onde,

E corresponde à variável dependente de consumo de energia (em MWh);

X_P corresponde à variável de produção (em toneladas ou peças);

$X'_{P_{Te}}$ corresponde à variável binária do processo de produção de tecidos;

$X'_{P_{Ma}}$ corresponde à variável binária do processo de produção de malhas;

$X'_{S_{Be}}$ corresponde à variável binária do processo de beneficiamento;

e $X'_{P_{Co}}$ corresponde à variável binária do processo de produção de confecções.

4.1.4 Nível 1: Planta

Para o nível 1 da estrutura hierárquica, é previsto a aplicação de um modelo de regressão linear múltipla baseado na ferramenta *EPI* do programa *Energy Star* (2021).

O resultado de sua aplicação fornece os coeficientes da equação que representa o consumo de energia das instalações industriais, os quais estão listados na Tabela 4.3².

Tabela 4.3 – Informações sobre o modelo de regressão linear múltipla para o nível 1 da estrutura hierárquica do setor têxtil e de vestuário

Nível 1: Planta		
Variáveis		Coeficientes
Constante		-7,84421037
$\ln(\text{Produção})$		2,0439334
Nível 3 Processos industriais	Produção de fios	0
	Produção de tecidos	-0,84062736
	Produção de malhas	-0,86336849
	Beneficiamento	-3,62041445
	Produção de confecções	-17,7707236
Nível 4 Sistemas de processos industriais	Sistemas de distribuição	0
	Sistemas motrizes	0
	Sistemas térmicos	0
	Sistemas de iluminação	0
Nível 4 Sistemas auxiliares	Sistemas de condicionamento ambiental	0
	Sistemas de ar comprimido	0

A Equação (10) abaixo representa o modelo de regressão linear múltipla do nível 1 do *benchmarking* energético para o setor têxtil e de vestuário.

$$\ln(E) = -7,84 + 2,04 \times \ln(X_P) - 0,84 \times X'_{PTE} - 0,86 \times X'_{PMa} - 3,62 \times X'_{SBe} - 17,77 \times X'_{PCo} \quad (10)$$

Onde,

E corresponde a variável dependente de consumo de energia (em MWh);

² É bom lembrar que as variáveis qualitativas que representam os sistemas industriais considerados nas simulações não conseguem explicar a variação do consumo de energia no universo do *benchmarking*, conforme explicado no item 4.1.3. Em razão disso, seus coeficientes relacionados na Tabela 4.3 são nulos.

X_p corresponde a variável de produção (em toneladas ou peças);
 X'_{PTE} corresponde a variável binária do processo de produção de tecidos;
 X'_{PMA} corresponde a variável binária do processo de produção de malhas;
 X'_{SBe} corresponde a variável binária do processo de beneficiamento;
 e X'_{PCo} corresponde a variável binária do processo de produção de confecções.

4.2 Aplicação do *benchmarking* no setor têxtil e de vestuário

Após construir o *benchmarking* energético, as simulações seguem para sua aplicação através da avaliação de duas instalações industriais. A primeira delas, referenciada como *ITV00A*, corresponde a uma planta industrial que atua na produção de fios; já a segunda, referenciada como *ITV00B*, consiste em uma planta industrial que atua na produção de confecções.

4.2.1 Instalação industrial *ITV00A*

A Tabela 4.4 reúne as informações da instalação industrial *ITV00A* necessárias para a avaliação do seu desempenho em termos de eficiência energética. Em resumo, pode-se verificar que ela apresenta um consumo total de energia equivalente a 2.031 MWh, o qual é associado a uma produção de 2.000 toneladas de fios, ao longo de um período de um ano.

Tabela 4.4 – Informações de produção e consumo de energia da instalação industrial *ITV00A*

Informação	Quantidade	Unidade
Informações gerais		
Produção	2.000,00	toneladas
Processo industrial de atuação	Produção de fios	-
Linha de Produção		
Sistemas motrizes	1.200,00	MWh
Sistemas térmicos ³	100,00	toneladas de lenha
Sistemas de distribuição	0,00	MWh
Total	1.561,00	MWh

³ Para o cálculo de consumo final de energia da instalação industrial *ITV00A*, considerou-se um coeficiente de equivalência médio de 3,61 MWh/t de lenha (Brazil, 2021).

Informação	Quantidade	Unidade
Processos Auxiliares		
Sistemas de iluminação	20,00	MWh
Sistemas de condicionamento ambiental	300,00	MWh
Sistemas de ar comprimido	150,00	MWh
Total	470,00	MWh
Consumo total de energia	2.031,00	MWh

a) Nível 4: Sistemas industriais

No nível 4, as informações de produção e consumo de energia da *ITV00A* foram confrontadas com os modelos de regressão linear simples construídos para o *benchmarking* energético, conforme pode ser observado nas Figura 20 e Figura 21. Ao analisarmos os sistemas dessa instalação industrial nesse nível da estrutura hierárquica, é possível observar que ela apresenta um desempenho intermediário nos sistemas motrizes e um desempenho relativamente ruim nos sistemas térmicos. Isso porque ela (representada pelo losango preto da figura) está posicionada entre as retas e acima das retas resultantes da regressão linear simples (correspondentes ao *consumo* V_0 e o *consumo* V_1), respectivamente.

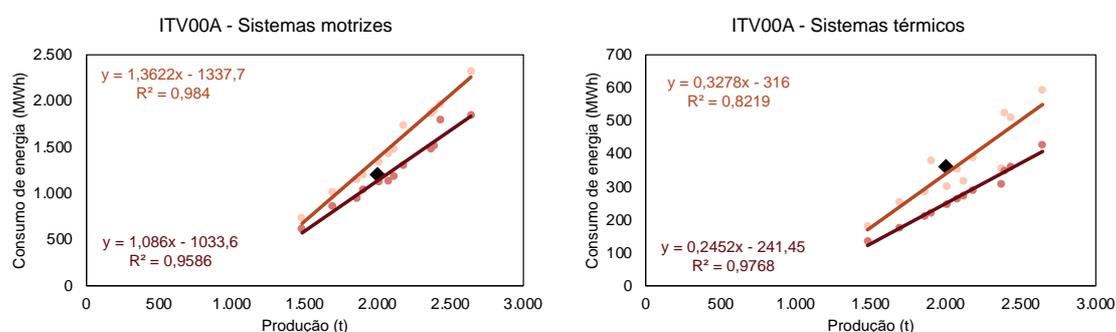


Figura 20 – Aplicação do *benchmarking* sobre os sistemas de processos industriais da *ITV00A*

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da *ITV00A*)

Analogamente, em seus sistemas auxiliares, pode-se inferir que a instalação industrial *ITV00A* apresenta um desempenho muito ruim junto aos sistemas de iluminação; e desempenhos intermediários tanto nos sistemas de condicionamento ambiental quanto nos sistemas de ar comprimido, conforme pode ser observado na Figura 21.

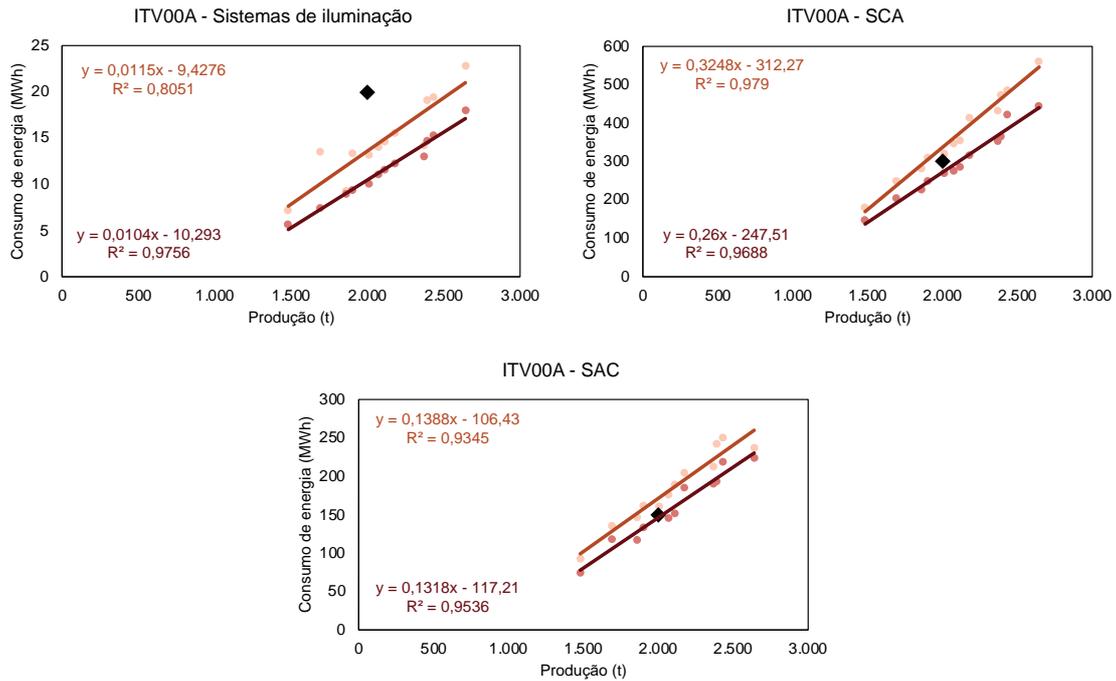


Figura 21 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas auxiliares da ITV00A

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da ITV00A)

b) Nível 3: Processos industriais

No nível 3, a aplicação do *benchmarking* energético posiciona a ITV00A em um desempenho energético intermediário, uma vez que ela se situa entre as retas correspondentes ao *consumo* V_0 e o *consumo* V_1 , conforme pode ser observado na Figura 22.

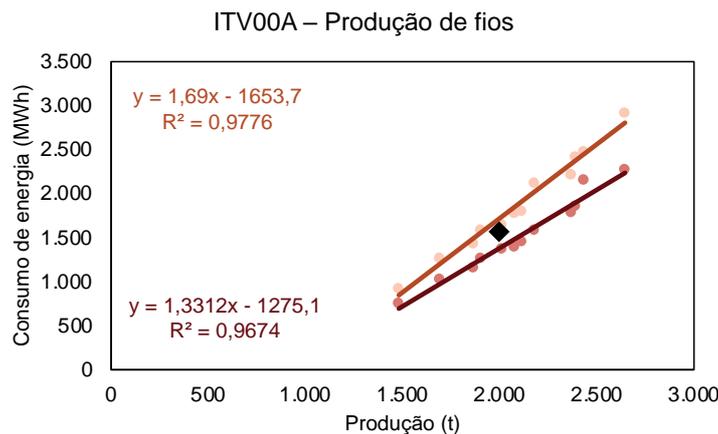


Figura 22 – Aplicação do benchmarking sobre o processo de produção de fios da ITV00A

(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da ITV00A)

c) Nível 2: Linha de produção

No nível 2, referente à linha de produção, a aplicação do *benchmarking* energético consiste em resolver a Equação (11) utilizando os dados da *ITV00A*. O resultado desse procedimento pode ser observado na Equação 5 abaixo, que indica que o consumo de energia da linha de produção dessa instalação industrial está acima do que o modelo de regressão linear múltipla prevê. Desse modo, a linha de produção da *ITV00A* pode ser considerada como ineficiente em termos de consumo de energia.

$$\begin{aligned} E &= 1.885,09 + 7,40 \times 10^{-5} \times 2.000 - 44,43 \times 0 - 82,59 \times 0 \\ &\quad - 288,97 \times 0 - 2.124,77 \times 0 \\ &= \mathbf{1.885,23} < \mathbf{2.031,00} \end{aligned} \quad (11)$$

d) Nível 1: Planta

No nível 1, referente à instalação industrial como um todo, o *benchmarking* energético aplica um modelo de regressão linear múltipla baseado na ferramenta *EPI* do programa *Energy Star* (2021). Como resultado, obtém-se o gráfico da Figura 23, o qual atribui um *score* de 78 à instalação industrial *ITV00A*. Isso significa que, se todas as indústrias que compõem o *benchmarking* energético fossem semelhantes a *ITV00A*, 22% delas consumiriam igual ou menos energia que essa instalação industrial.

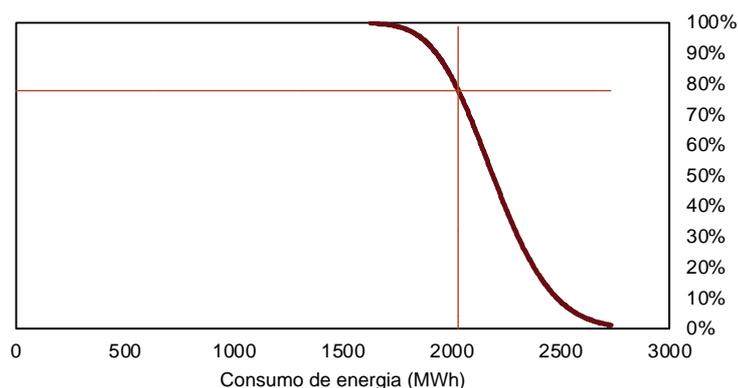


Figura 23 – Aplicação do *benchmarking* sobre a *ITV00A* em nível de planta

e) Síntese da avaliação da *ITV00A*

A metodologia de *benchmarking* energético proposta pressupõe que a análise do desempenho das instalações industriais se dê através de um esquema lógico dentro do qual seja possível explorar os seus potenciais de melhoria de eficiência energética ao longo da cadeia proposta para o seu setor industrial. Nesse sentido, a Figura 25 traz os resultados obtidos para a *ITV00A* organizados segundo a estrutura hierárquica definida para o setor têxtil e de vestuário. Assim, apesar dessa instalação industrial apresentar um desempenho relativamente bom em termos de eficiência energética no nível 1, é possível verificar os seus desempenhos nos níveis inferiores, explorando as possibilidades de aperfeiçoar o seu consumo de energia.

Além disso, essa estruturação dos resultados permite a priorização de ações em áreas e/ou sistemas industriais, o que é útil, sobretudo, quando existem restrições de recursos financeiros. No caso da instalação industrial *ITV00A*, por exemplo, pode-se indicar como pontos de destaque os seus sistemas térmicos e de iluminação.

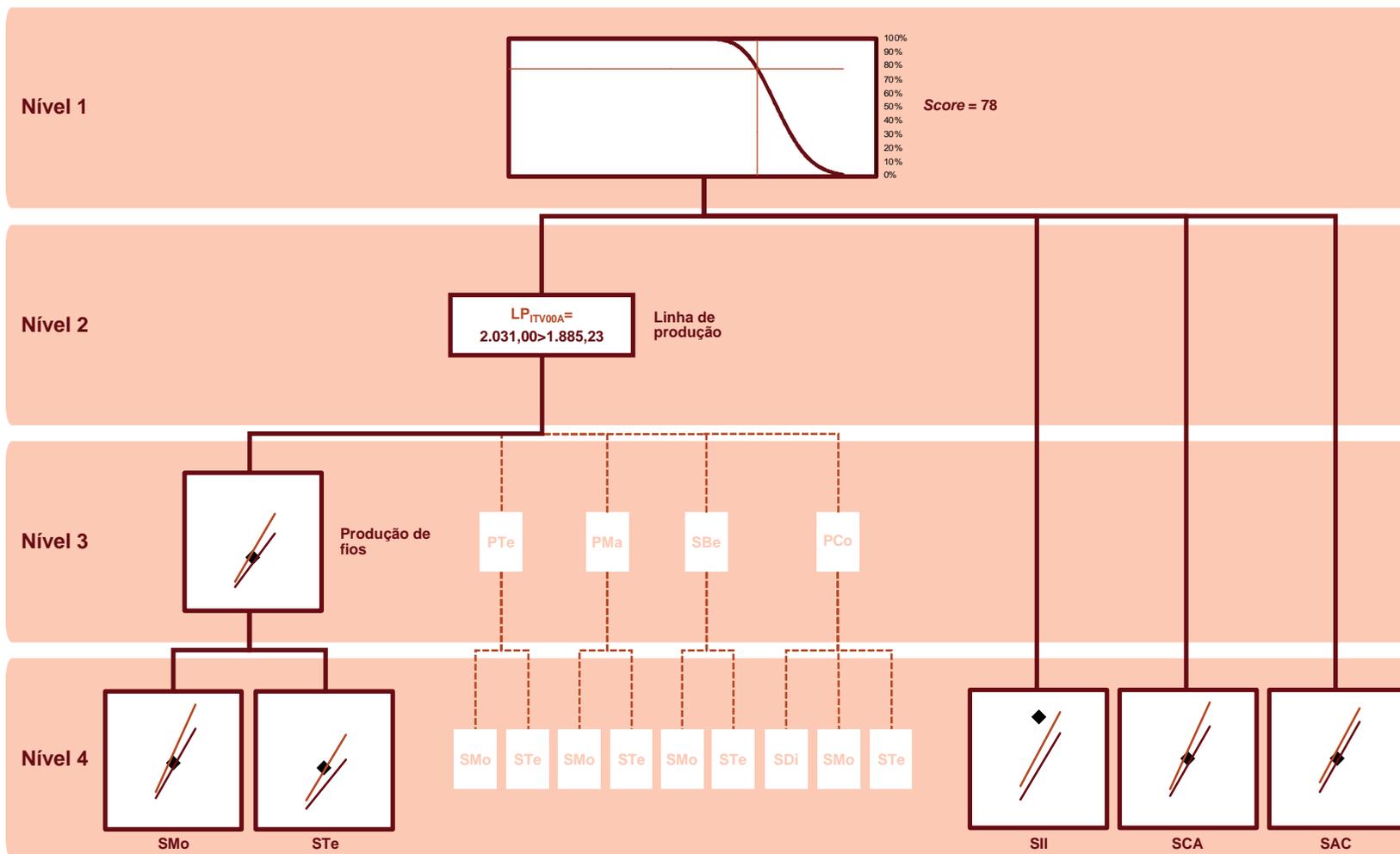


Figura 24 – Esquema síntese da avaliação da instalação industrial ITV00A

(Legenda: SMO: Sistemas motrizes; STe: Sistemas térmicos; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto que elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_i ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da ITV00A)

4.2.2 Instalação industrial *ITV00B*

A Tabela 4.5 traz as informações da instalação industrial *ITV00B* que são necessárias para a avaliação do seu desempenho em termos de eficiência energética. Em síntese, pode-se verificar que ela apresenta um consumo total de energia igual a 650 MWh, o qual está associado a uma produção de 6.500.000 peças de confecção, ao longo de um período de um ano.

Tabela 4.5 – Informações de produção e consumo de energia da instalação industrial *ITV00B*

Informação	Quantidade	Unidade
Informações gerais		
Produção	6.500.000,00	peças
Processo industrial de atuação	Produção de confecções	-
Linha de Produção		
Sistemas motrizes	40,00	MWh
Sistemas térmicos	170,00	MWh
Sistemas de distribuição	50,00	MWh
Total	260,00	MWh
Processos Auxiliares		
Sistemas de iluminação	30,00	MWh
Sistemas de condicionamento ambiental	60,00	MWh
Sistemas de ar comprimido	300,00	MWh
Total	390,00	MWh
Consumo total de energia	650,00	MWh

a) Nível 4: Sistemas industriais

No nível 4, os dados de produção e consumo de energia da *ITV00B* foram confrontados com aqueles dos modelos de regressão linear simples construídos para o *benchmarking* energético, conforme ilustra a Figura 25 e a Figura 26. Quando analisamos os sistemas dessa instalação industrial nesse nível da estrutura hierárquica, verifica-se que ela apresenta um desempenho relativamente ruim em seus sistemas de distribuição, motrizes e térmicos. Isso porque a *ITV00B* (representada pelo losango

preto nos gráficos) está posicionada acima das retas resultantes da regressão linear simples (correspondentes ao *consumo* V_0 e o *consumo* V_1).

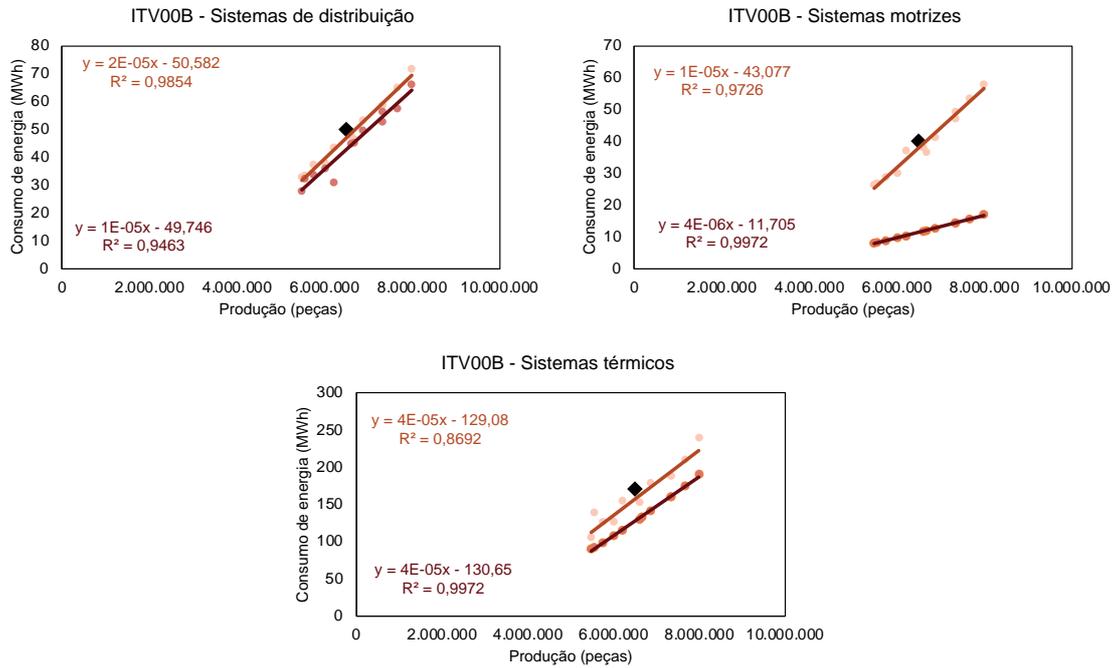


Figura 25 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas de processos industriais da ITV00B
(Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da ITV00B)

Seguindo a mesma lógica em seus sistemas auxiliares, pode-se concluir que a instalação industrial ITV00B apresenta um desempenho relativamente ruim nos sistemas de iluminação e de ar comprimido; enquanto apresenta um bom desempenho junto aos sistemas de condicionamento ambiental, conforme ilustra a Figura 26.

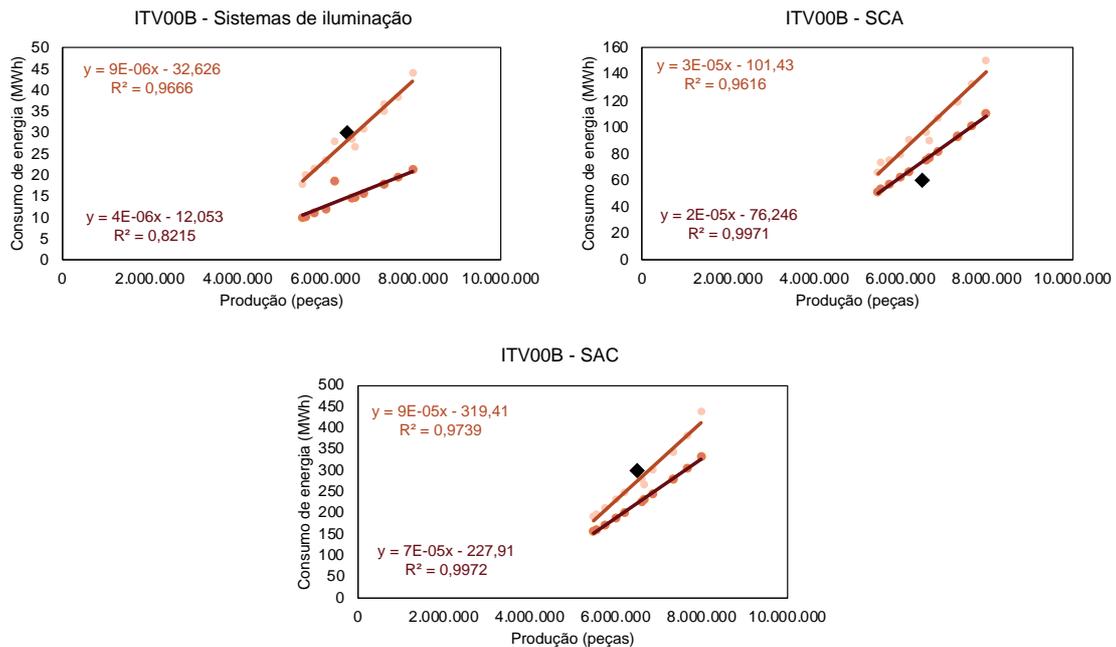


Figura 26 – Aplicação do benchmarking sobre os sistemas auxiliares da ITV00B

(Legenda: SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da *ITV00B*)

b) Nível 3: Processos industriais

No nível 3, a aplicação do *benchmarking* energético classifica a *ITV00B* com desempenho energético relativamente ruim, uma vez que o consumo do seu processo de produção de confecções se posiciona acima das retas correspondentes ao *consumo* V_0 e o *consumo* V_1 , conforme pode ser observado na Figura 27.

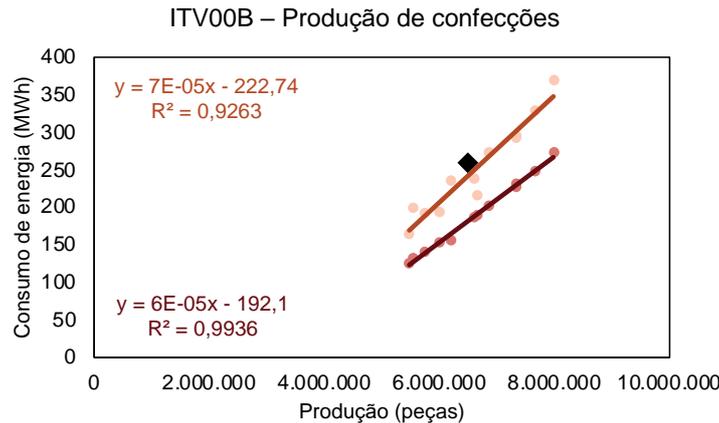


Figura 27 – Aplicação do *benchmarking* sobre o processo de produção de confecções da *ITV00B*
 (Legenda: Elementos de cor mais clara correspondem a dados de *consumo* V_0 , enquanto elementos de cor mais escura correspondem a dados de *consumo* V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da *ITV00B*)

c) Nível 2: Linha de produção

No nível 2, referente à linha de produção, o *benchmarking* energético aplica a Equação (12) empregando os dados da *ITV00B*. A Equação 6 a seguir fornece o resultado desse procedimento, o qual indica que o consumo de energia da linha de produção dessa instalação industrial está acima do que o modelo de regressão linear múltipla prevê. Assim, a linha de produção da *ITV00B* pode ser considerada como ineficiente em termos de consumo de energia.

$$\begin{aligned}
 E &= 1.885,09 + 7,40 \times 10^{-5} \times 6.500.000 - 44,43 \times 0 - 82,59 \times 0 \\
 &\quad - 288,97 \times 0 - 2.124,77 \times 1 \\
 &= 241,44 < 650,00
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

d) Nível 1: Planta

No nível 1 da estrutura hierárquica, referente à instalação industrial como um todo, a aplicação do *benchmarking* energético consiste em empregar um modelo de regressão linear múltipla baseado na ferramenta *EPI* do programa *Energy Star* (2021). Através desse procedimento, obtém-se o gráfico da Figura 28, que atribui um *score* de 39 à instalação industrial *ITV00B*. Ou seja, se todas as indústrias que compõem o

benchmarking energético fossem semelhantes a *ITV00B*, 61% delas consumiriam igual ou menos energia que essa instalação industrial.

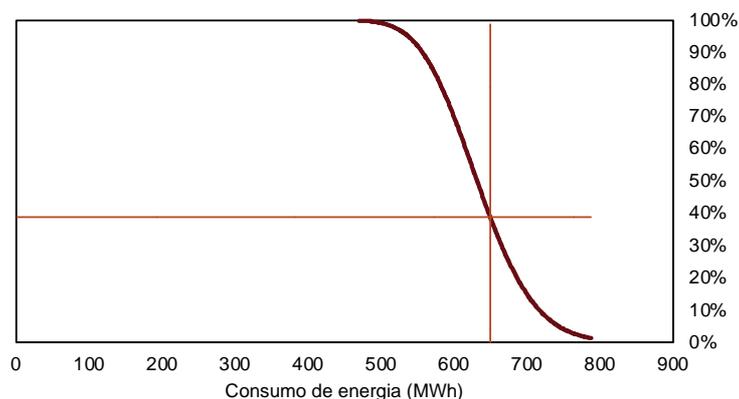


Figura 28 – Aplicação do *benchmarking* sobre a *ITV00B* em nível de planta

e) Síntese da avaliação da *ITV00B*

Analogamente a instalação *ITV00A*, a Figura 29 traz os resultados obtidos para a *ITV00B* organizados segundo a estrutura hierárquica definida para o setor têxtil e de vestuário. Nela, é possível identificar os principais sistemas industriais responsáveis pelo desempenho relativamente ruim da *ITV00B* no nível 1.

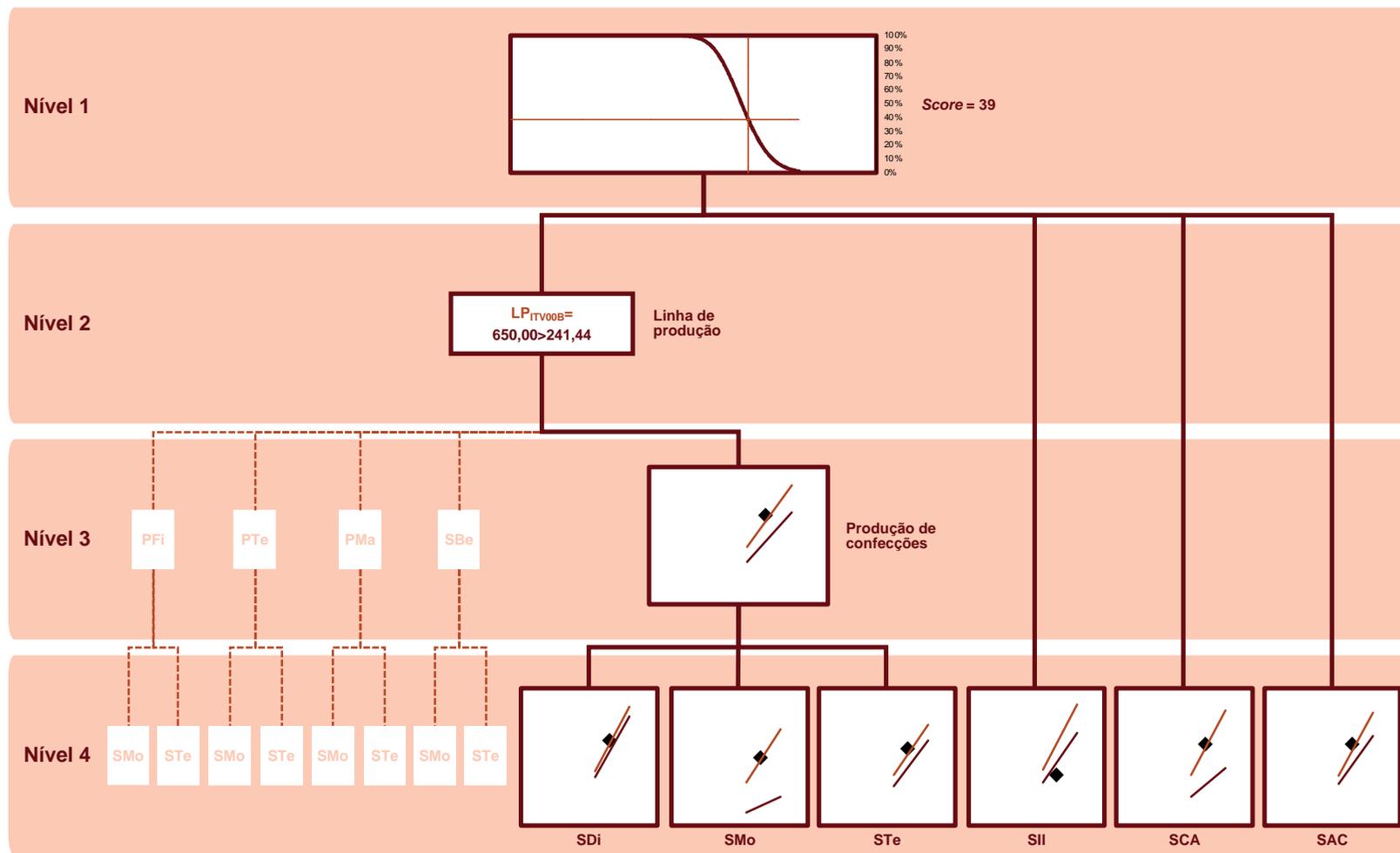


Figura 29 – Esquema síntese da avaliação da instalação industrial ITV00B

(Legenda: SMo: Sistemas motrizes; STe: Sistemas térmicos; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido; Elementos de cor mais clara correspondem a dados de consumo V_0 , enquanto que elementos de cor mais escura correspondem a dados de consumo V_1 ; O losango preto corresponde aos dados de produção e consumo de energia da ITV00B)



5. Diretrizes para aplicação da proposta metodológica

Com o intuito de extrapolar a aplicação da metodologia de *benchmarking* energético proposta, o presente relatório apresenta a seguir as estruturas hierárquicas definidas para as cadeias dos seguintes setores industriais:

- i) Setor têxtil e de vestuário;
- ii) Setor de alimentos e bebidas;
- iii) Setor de metalurgia e produtos metálicos;
- iv) Setor de transformados plásticos;
- v) Setor químico e farmacêutico;
- vi) Setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos;
- vii) Setor de papel e celulose.

Apesar dessas indicações, vale destacar que a abordagem em níveis hierárquicos permite que as estruturas definidas para esses setores possam ser adaptadas caso elas não reflitam a realidade das instalações industriais a serem avaliadas. Isso significa que é possível adicionar elementos aos níveis 3 e 4 da estrutura hierárquica sem afetar a lógica envolvida por trás da metodologia de *benchmarking* energético.

Além disso, cumpre ressaltar que para aplicação inicial do modelo de *benchmarking* com os dados até então disponíveis, decidiu-se pela incorporação do setor de automóveis e peças ao setor de metalurgia e produtos metálicos. Isso se deve pela ausência de dados específicos para o setor de automóveis e peças, bem como o fato do setor de metalurgia produzir peças para a fabricação de automóveis.

5.1 Setor têxtil e de vestuário

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

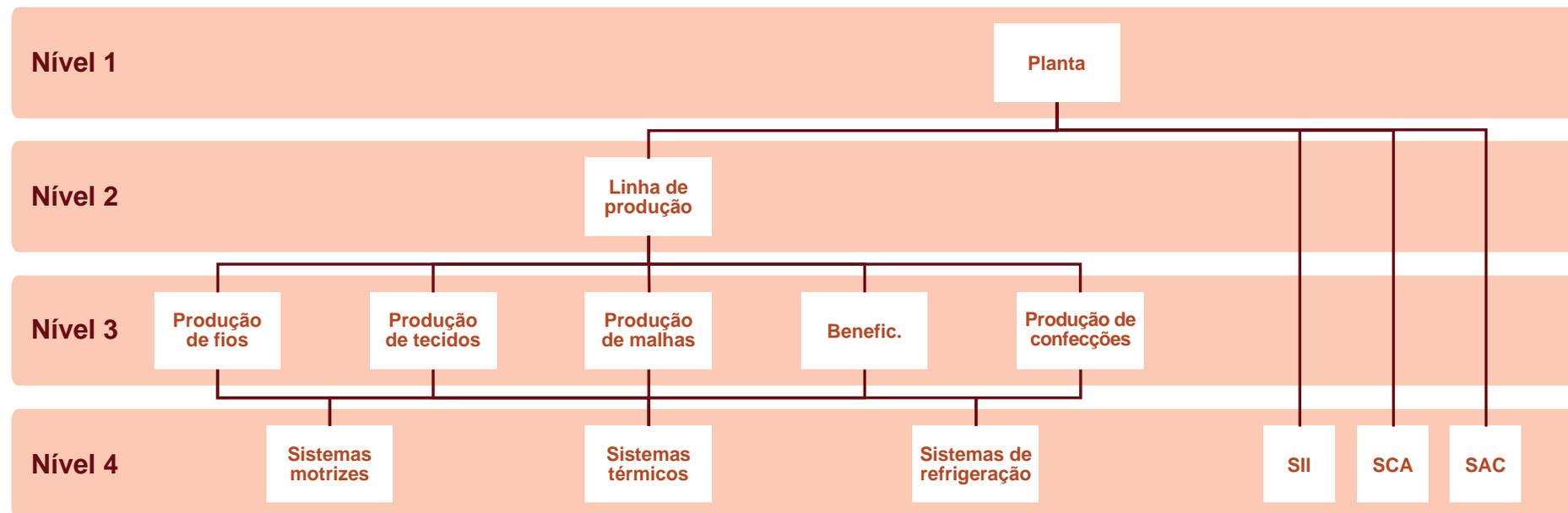


Figura 30 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor têxtil e de vestuário

(Legenda: SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.2 Setor de alimentos e bebidas

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

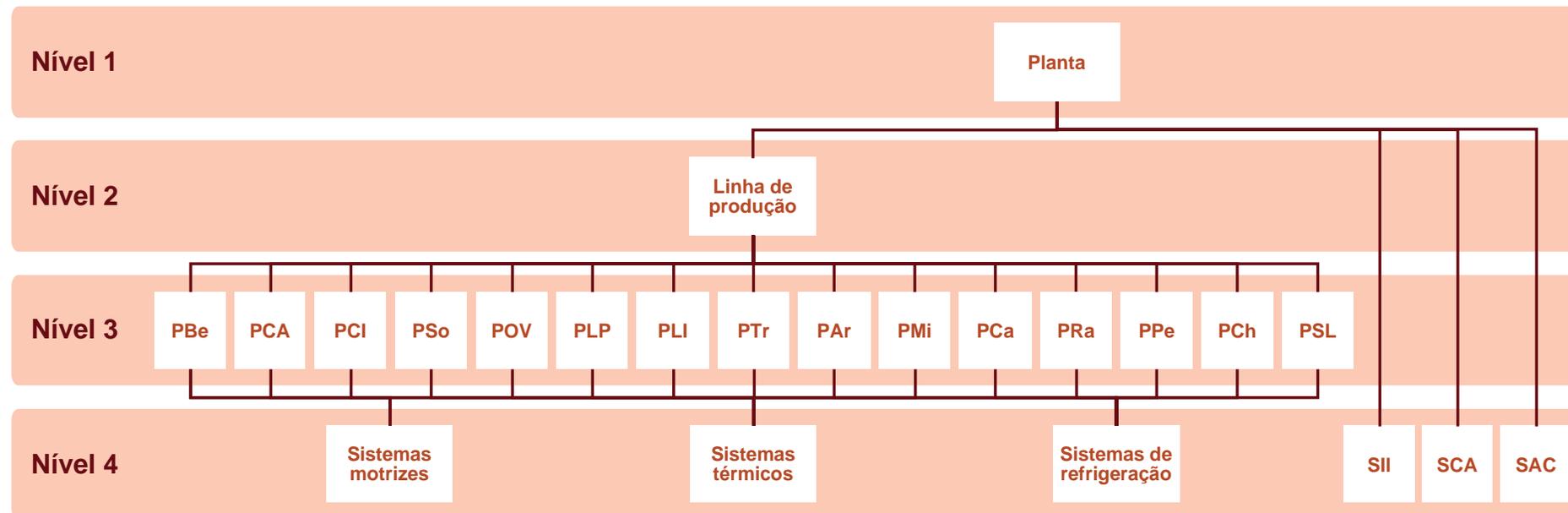


Figura 31 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de alimentos e bebidas

(Legenda: PBe: Produção de bebidas; PCA: Produção de carnes (abate); PCI: Produção de carnes (industrialização); PSo: Produção de soja; POV: Produção de óleo vegetal (refino); PLP: Produção de leite (pasteurizado e UHT); PLI: Produção de leite (industrialização); PTr: Produção de trigo; PAr: Produção de arroz; PMi: Produção de milho; PCa: Produção de café; PRa: Produção de rações e alimentos para animais; PPe: Produção de pescados; PCh: Produção de cacau, chocolate e doces; e PSL: Produção de suco de laranja; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.3 Setor de metalurgia e produtos metálicos

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

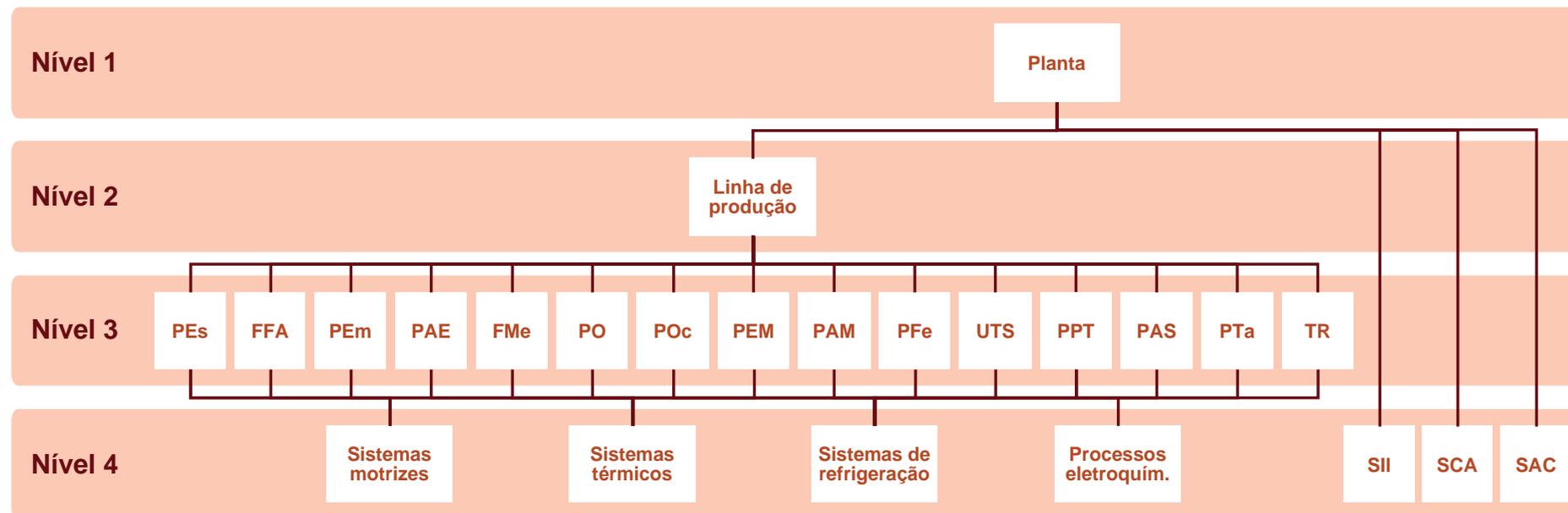


Figura 32 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de metalurgia e produtos metálicos

(Legenda: PEs: Produção de esquadrias de metal; FFA: Fundição de ferro e aço; PEm: Produção de embalagens metálicas; PAE: Produção de artefatos estampados de metal; FMe: Fundição de metais não ferrosos e suas ligas; PO: Produção de outros produtos de metal não especificados anteriormente; POc: Produção de obras de caldeiraria pesada; PEM: Produção de estrutura metálica; PAM: Produção de artigos de metal para uso doméstico e pessoal; PFe: Produção de ferramentas; UTS: Serviços de usinagem torneira e solda; PPT: Produção de produtos de trefilados de metal, exceto padronizados; PAS: Produção de artigos de serralheria, exceto esquadrias; PTa: Produção de tanques, reservatórios metálicos e caldeiras para aquecimento central; TR: Serviços de tratamento e revestimento em metais; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.4 Setor de transformados plásticos

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

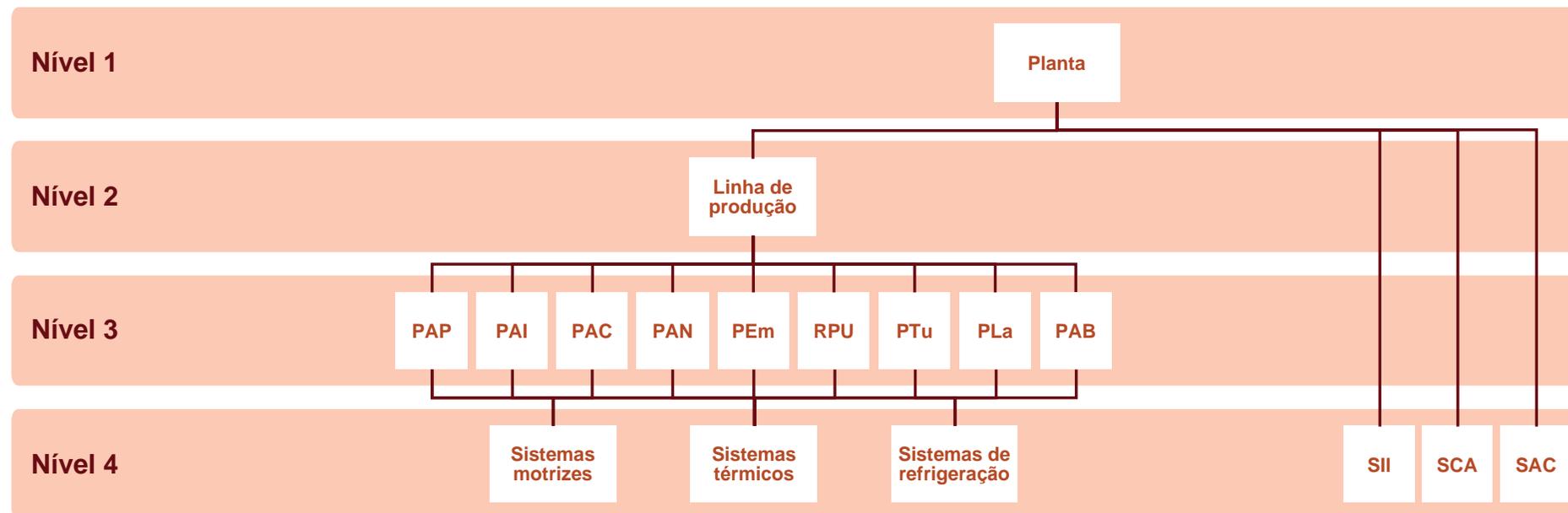


Figura 33 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de transformados plásticos

(Legenda: PAP: Produção de artefatos de material plástico para uso pessoal e doméstico; PAI: Produção de artefatos de material plástico para usos industriais; PAC: Produção de artefatos de material plástico para uso na construção, exceto tubos e acessórios; PAN: Produção de artefatos de material plástico para outros usos não especificados anteriormente; PEm: Produção de embalagem de material plástico; RPU: Reforma de pneumáticos usados; PTu: Produção de tubos e acessórios de material plástico para uso na construção; PLa: Produção de laminados planos e tubulares de material plástico; PAB: Produção de artefatos de borracha não especificados anteriormente; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.5 Setor químico e farmacêutico

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

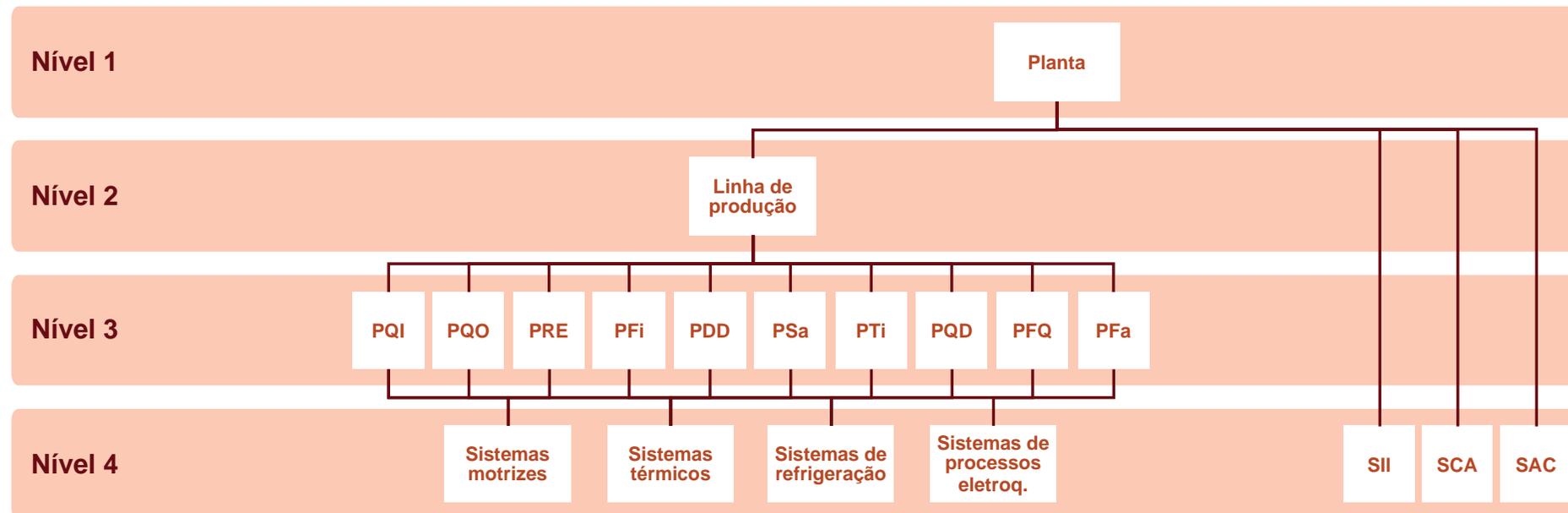


Figura 34 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor químico e farmacêutico

(Legenda: PQI: Produção de produtos químicos inorgânicos; PQO: Produção de produtos químicos orgânicos; PRE: Produção de resinas e elastômeros; PFi: Produção de fibras artificiais e sintéticas; PDD: Produção de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários; PSa: Produção de sabões, detergentes, produtos de limpeza, cosméticos, de perfumaria e higiene pessoal; PTi: Produção de tintas, vernizes, esmalte, lacas e produtos afins; PQD: Produção de produtos e preparados químicos diversos; PFQ: Produção de produtos farmoquímicos; PFa: Produção de produtos farmacêuticos; SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.6 Setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

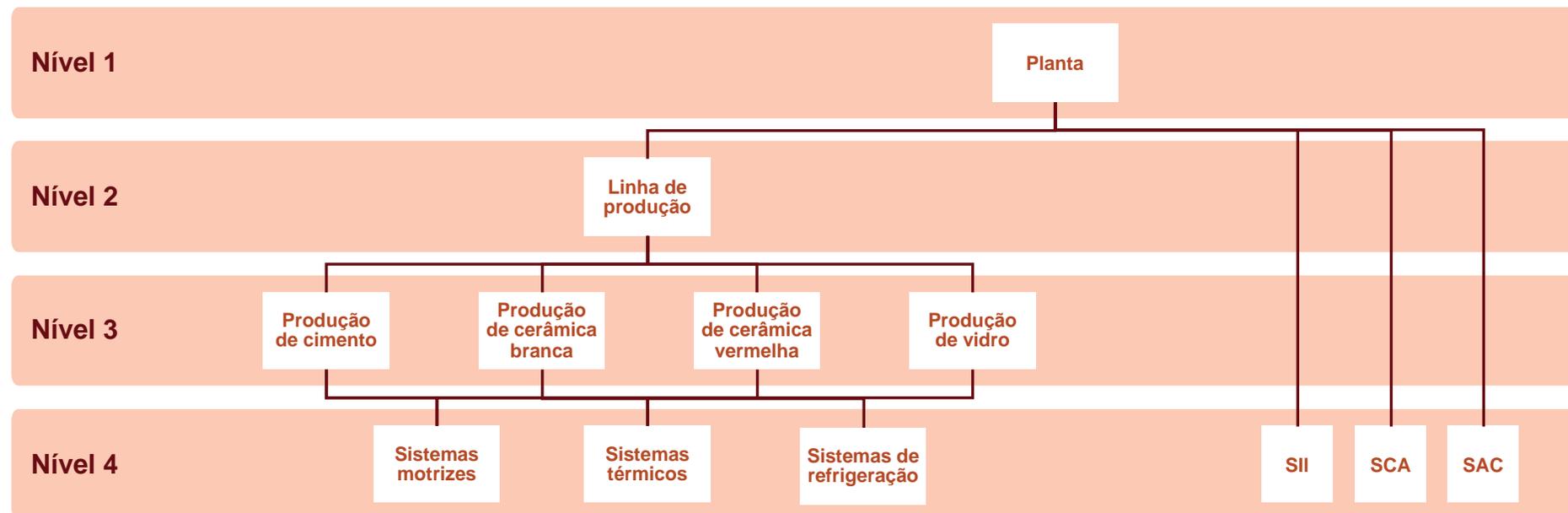


Figura 35 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos

(Legenda: SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

5.7 Setor de papel e celulose

www.programa-potencializee.com.br
contato@programa-potencializee.com.br

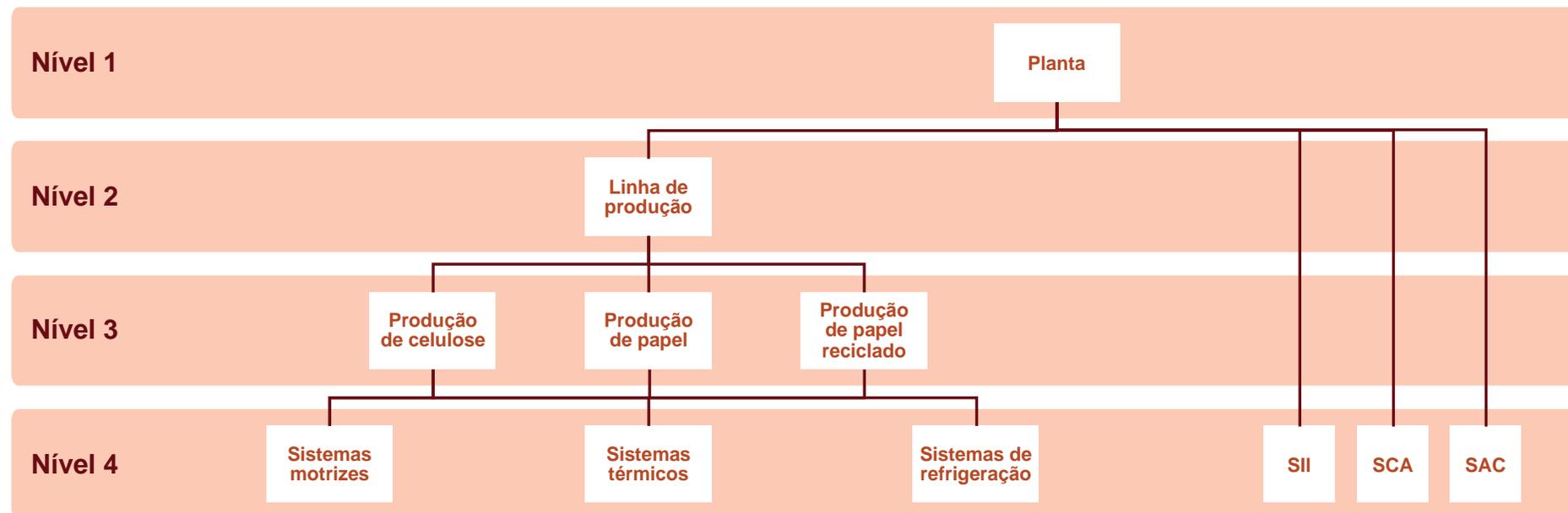


Figura 36 – Estrutura hierárquica da cadeia de valor do setor de papel e celulose

(Legenda: SII: Sistemas de iluminação; SCA: Sistemas de condicionamento ambiental; SAC: Sistemas de ar comprimido)

6. Considerações finais

A metodologia proposta associa conceitos de modelagem *bottom-up* e *top-down* às metodologias de regressão linear simples e regressão linear múltipla para o desenvolvimento do *benchmarking* energético para diferentes indústrias. Ela tomou como base a revisão de literatura realizada na tarefa 1, intitulada “Estudos de Metodologias de *Benchmark*”, do Cluster 3, segundo o plano de trabalho do projeto.

A abordagem baseada em uma estrutura hierárquica, apesar de permitir um diagnóstico mais detalhado do quadro de consumo energético de uma determinada instalação industrial, impõe desafios relacionados à grande especificidade e quantidade de dados necessários para a aplicação do modelo. Visando contornar essa dificuldade, foi também considerada a avaliação do consumo energético em nível de instalação industrial, que considera a adoção de um indicador único (ou *score*).



7. Aviso Legal (Disclaimer)

A ENERGY BI, empresas e instituições consorciadas contratadas no Projeto GIZ BMU-C5-Brazil Industrial Energy Efficiency-Set Up, Nº de Referência: 12.9097.2-680.00, contrato nº 83392480, a seguir identificados como CONSÓRCIO, informam que os dados disponíveis utilizados para estudo, desenvolvimento e testes de validação do Modelo de Benchmarking de Projetos de Eficiência Energética para as Indústrias e Calculadora de Eficiência Energética, a seguir identificados como BENCHMARKING e CALCULADORA, respectivamente, foram obtidos a partir de projetos desenvolvidos no âmbito dos Planos Anuais de Aplicação de Recursos(PAR), fornecidos pelo PROCEL, bem como de projetos do Programa META, fornecidos pela EPE, a seguir identificados como DADOS.

Ressalta-se que os DADOS utilizados no BENCHMARKING e CALCULADORA não foram estruturados por ocasião da aquisição de DADOS destes projetos para estas finalidades (BENCHMARKING e CALCULADORA). Constatou-se, portanto, que algumas informações relevantes para o estudo de BENCHMARKING e CALCULADORA não estavam presentes (como por exemplo dados da produção industrial em toneladas/ano) e/ou não haviam detalhes para qualificá-los adequadamente (como por exemplo a quais ações detalhadas de eficiência energética se referiam as economias e o investimento).

Para que os modelos de BENCHMARKING e CALCULADORA pudessem ser validados, o CONSÓRCIO adotou algumas estimativas baseadas em dados setoriais das indústrias, conforme constam nas referências dos relatórios elaborados.

Os testes de validação do BENCHMARKING e CALCULADORA comprovaram que os modelos são robustos, todavia os resultados gerados de metas de consumo específico médio (R\$/t anual, ou outra unidade utilizada) e investimentos médios (R\$/MWh economizado anual), bem como a própria curva de regressão utilizada como técnica no BENCHMARKING e CALCULADORA, refletem as incertezas pela aplicação dos DADOS utilizados com baixa confiabilidade.

O CONSÓRCIO reafirma que os dados utilizados tiveram como objetivo a validação do modelo de BENCHMARKING e CALCULADORA, bem como o estabelecimento das regras estatísticas, a seguir denominadas REGRAS, que deverão ser observadas para a confiabilidade mínima de utilização dos modelos de BENCHMARKING e CALCULADORA. As REGRAS estão apresentadas nos relatórios setoriais das indústrias na seção “Regras estatísticas”.

O CONSÓRCIO não recomenda e não se responsabiliza pela utilização dos resultados obtidos no ambiente de teste dos modelos de BENCHMARKING e CALCULADORA, uma vez que os mesmos foram gerados a partir de DADOS estimados e não qualificados adequadamente nos projetos disponibilizados.

O CONSÓRCIO recomenda que a partir da aquisição de novos dados qualificados para o BENCHMARKING e CALCULADORA a serem levantados no âmbito do Programa PotencializEE, novas regressões sejam geradas pelo BENCHMARKING e CALCULADORA e uma vez atendidas as REGRAS, possam ser apurados resultados confiáveis para aplicação em políticas públicas.

Por fim, cabe ressaltar que o modelo de BENCHMARKING e CALCULADORA evoluirão à medida que maiores volume de dados qualificados sejam utilizados, observadas as REGRAS que refletem a confiabilidade das regressões e cálculos estatísticos.



8. Referências bibliográficas

- Andersson, E., Arfwidsson, O., Thollander, P., 2018. Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency index: Results based on an energy audit policy program. *J. Clean. Prod.* 182, 883–895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.027>
- Boyd, G., Dutrow, E., Tunnessen, W., 2008. The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *J. Clean. Prod.* 16, 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.024>
- Brazil, 2021. Balanço Energético Nacional 2020. Rio de Janeiro.
- CNI, PROCEL, Eletrobras, 2010. Oportunidades de eficiência energética para a indústria - Setor têxtil. Brasília.
- Energy Star, 2021. Energy Star Score.
- EVO, 2019. Uncertainty Assessment for IPMVP.
- Tan, Y.S., Tjandra, T.B., Song, B., 2015. Energy Efficiency Benchmarking Methodology for Mass and High-Mix Low-Volume Productions. *Procedia CIRP* 29, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.200>
- Zhang, Y., Hong, M., Li, J., Chen, X., Zeng, Z., Liu, H., 2016. Benchmarking Analysis of Energy Efficiency Indicators in Paper Mill. *BioResources* 11. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9723-9740>



**Deutsche Gesellschaft für Internationale
 Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**
 Agência Alemã de Cooperação
 Internacional
 GIZ Agência Brasília
 SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
 Ed. Brasília Trade Center
 70.711-902 Brasília/DF
 +55-61-2101-2170
www.giz.de/brasil



.....

PARCEIROS



.....

APOIO



.....

APOIO FINANCEIRO

