



Desenvolvimento Conceitual de Metodologia de Medição e Verificação de Consumos de Energéticos nas Indústrias

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Robson Braga de Andrade

Presidente

Diretoria de Comunicação

Carlos Alberto Barreiros

Diretor

Diretoria de Desenvolvimento Industrial

Carlos Eduardo Abijaodi

Diretor

Diretoria de Educação e Tecnologia

Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti

Diretor

Diretoria de Políticas e Estratégia

José Augusto Coelho Fernandes

Diretor

Diretoria de Relações Institucionais

Mônica Messenberg Guimarães

Diretora

Diretoria Jurídica

Hélio José Ferreira Rocha

Diretor



Desenvolvimento Conceitual de Metodologia de Medição e Verificação de Consumos de Energéticos nas Indústrias

© 2012. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

Gerência de Infraestrutura

FICHA CATALOGRÁFICA

C748d

Confederação Nacional da Indústria.

Desenvolvimento conceitual de metodologia de medição e
verificação de consumos de energéticos nas indústrias / Confederação
Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2012.

55 p. : il.

ISBN 978-85-7957-072-8

1.Eficiência energética. 2. Indústria. I. Título.

CDU: 537.214

CNI

*Confederação Nacional da Indústria
Setor Bancário Norte
Quadra 1 – Bloco C
Edifício Roberto Simonsen
70040-903 – Brasília – DF
Tel.: (61) 3317- 9000
Fax: (61) 3317- 9994
<http://www.cni.org.br>*

ABRACE

*Associação Brasileira de Grandes
Consumidores Industriais de Energia e
de Consumidores Livres
SBN - Quadra 01, Bloco B, nº.14, salas
701/702
70041 902 - Brasília - DF
Tel./Fax: 61 3878 3500
abrace@abrace.org.br*

EMBAIXADA BRITÂNICA

*Setor de Embaixadas Sul, Quadra 801,
Lote 8
70408-900 - Brasília - DF
Tel.: 61 3329-2300*

*Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC
Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992
sac@cni.org.br*

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

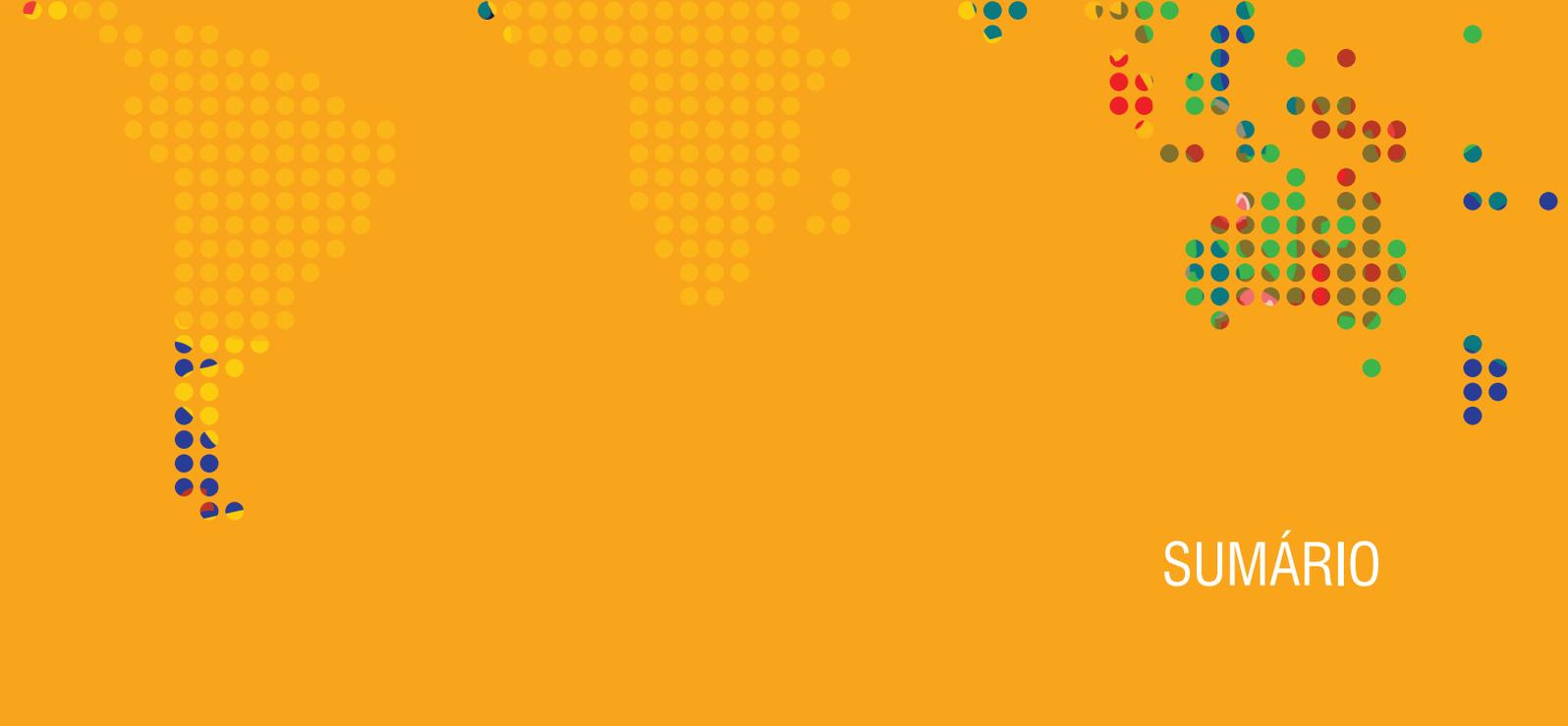
LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvore de decisão sobre as opções do IPMVP.....	13
Figura 2 - Resumo da metodologia proposta.....	17
Figura 3 - Definição do limite de medição	18
Figura 4 - Exemplo de regressão para aproximar os pontos de operação a uma curva	20
Figura 5 - Pontos de operação do período total de referência.....	21
Figura 6 - Período de referência dividido em grupos.....	22
Figura 7 - Quadro T	24
Figura 8 - Fatores de emissão da margem de operação e da margem de construção.....	29
Figura 9 - Esquema ilustrativo da escolha de volume de controle e variáveis importantes para a caldeira	32
Figura 10 - Variação do PCI do Gás Natural.....	33
Figura 11 - Pontos de operação do período de referência e respectiva regressão.....	35
Figura 12 - Esquema ilustrativo de volume de controle e variáveis importantes para o forno.....	39
Figura 13 - Esquema do forno de aquecimento com recuperador.....	41
Figura 14 - Pontos de operação para as duas operações no forno e suas respectivas regressões	41
Figura 15 - Gráfico da Economia horária obtida para o exemplo do forno.....	42
Figura 16 - Esquema ilustrativo de volume de controle e variáveis importantes na secagem	43
Figura 17 - Esquema ilustrativo de volume de controle e variáveis importantes na eletrólise.....	45
Figura 18 - Sistema de bombeamento - Exemplo	50
Figura 19 - Curvas Características obtidas	51
Figura 20 - Esquema ilustrativo do aproveitamento da energia em cada equipamento	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro de instrumentos adaptado do Quadro 5 – Tipos de medidores chaves do IPMVP.....	27
Tabela 2 - Fatores de emissão para combustíveis e respectivos potenciais de aquecimento	28
Tabela 3 - Cálculo do fator de emissão de CO ₂ da margem combinada do SIN.....	29

Tabela 4 - Cálculo da Economia horária para o exemplo da caldeira	36
Tabela 5 - Cálculos dos Erros Padrões	37
Tabela 6 - Cálculo da Economia horária para o exemplo do forno	42
Tabela 7 - Influência da densidade de corrente no consumo específico	46
Tabela 8 - Economia horária obtida para o exemplo da bomba	52



SUMÁRIO

RESUMO	7
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 TERMINOLOGIA DO IPMVP.....	11
3 METODOLOGIA PROPOSTA.....	15
3.1 Etapas do Processo	16
3.2 Planejamento.....	17
3.3 Coleta de Dados e Definição de Equação do Período de Referência	19
3.4 Levantamento de Dados do Pós-Execução e Cálculo da Economia de Energia	22
3.5 Cálculo das emissões evitadas.....	27
4 PARTICULARIDADES DAS CLASSES DE EQUIPAMENTOS	31
4.1 Caldeiras	31
4.2 Fornos.....	38
4.3 Secadores.....	43
4.4 Eletrólise	45
4.5 Bombas	47
4.6 Conjunto de Tração	52
5 REFERÊNCIAS	55



RESUMO

O presente documento apresenta os conceitos de uma metodologia de medição e verificação (M&V) que permitirá identificar de forma clara a redução do consumo de energéticos (eletricidade e combustíveis) e a respectiva redução de emissão de gases de efeito estufa resultantes de projetos de eficiência energética industriais. Ela deverá garantir transparência, confiabilidade e rastreabilidade aos resultados.

Os conceitos definidos aqui deverão nortear o processo de M&V para ações de eficiência energética aplicadas aos seguintes equipamentos:

- Conjuntos de tração (motores elétricos, acoplamentos e inversores de frequência)
- Bombas hidráulicas
- Caldeiras
- Fornos à combustão
- Secadores
- Eletrólise.

Eles partem das diretrizes do IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) e enfocam um nível técnico complementar.

A economia referente a uma ação de eficiência energética será calculada com base no método do “Uso Evitado de Energia”, definido no item 4.6.1 do IPMVP. O consumo evitado é a diferença entre a energia teórica que o equipamento iria consumir caso não houvesse a ação de eficiência e a energia efetivamente consumida após a implantação da medida. Enquanto a segunda pode ser facilmente obtida por meio das medições e do registro de consumos de energéticos, a primeira deve ser calculada da seguinte forma:

- Medem-se e registram-se os consumos energéticos (eletricidade e combustíveis) e a produção em um período pré-execução da medida de eficiência energética, definido como período de referência
- Constrói-se a curva e obtém-se a equação de consumo médio (ou consumo específico médio) em função da produção do equipamento (da carga). Quando o equipamento tiver consumos térmico

e elétrico, deve-se construir uma equação para cada um deles

- Medem-se e registram-se as produções do período pós-execução
- Substituindo-se as produções do período pós-execução nas equações do período pré-execução (referência), obtém-se a energia que o equipamento iria consumir caso não houvesse a ação de eficiência.

A metodologia leva ainda em conta outros fatores que podem interferir diretamente no consumo específico e que não estão associados à característica do equipamento, como variações na composição e umidade da matéria-prima, variações na composição dos produtos finais, etc. Para evitar que alterações nessas variáveis afetem o cálculo de economia, a metodologia prevê que as comparações entre os consumos pré e pós-execução sejam realizadas sempre na mesma base, ou seja, devem-se comparar momentos onde essas variáveis são iguais. Para que isso possa ser feito, elas também deverão ser medidas e registradas.

A partir das economias de energéticos, é calculado o impacto nas emissões de gases de efeito estufa utilizando-se de fatores já conhecidos, obtidos por meio do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

1. INTRODUÇÃO

Em sintonia com o crescente esforço mundial em combater o aquecimento global, o governo brasileiro instituiu a Política Nacional sobre Mudança de Clima - PNMC (Lei 12.187/09 e decreto 7.390/10), que, dentre outras coisas, estabelece que devem ser elaborados planos setoriais para redução de emissão de gases de efeito estufa. Eles englobam diversas áreas, dentre elas estão:

- Indústria de transformação e de bens de consumo duráveis
- Indústrias químicas finais e de base
- Indústria de papel e celulose
- Indústria de mineração
- Indústria da construção civil.

Para a indústria em geral, as principais formas de redução de emissão de gases de efeito estufa estão associadas à substituição de combustíveis fósseis por renováveis e a ações de melhoria de eficiência energética.

A fim de impulsionar a implantação de ações desse tipo, a CNI (Confederação Nacional da Indústria) está propondo um programa baseado na isenção de alguns encargos setoriais mediante o compromisso da indústria em investir os recursos “economizados” em projetos de eficiência energética, que promovam a redução de emissão de gases de efeito estufa.

Atualmente, mesmo sendo o setor industrial aquele que possui o maior consumo de energia (aproximadamente 40% do consumo energético total do país) e o que apresenta o maior potencial de economia, ele vem recebendo pouca atenção das políticas governamentais nos programas de eficiência energética, que vêm priorizando os setores residencial, público e comercial.

Além da escassez de iniciativas de eficiência energética voltadas à indústria, as que existem visam principalmente redução de consumo de energia elétrica, centradas em questões como iluminação e sistemas motrizes. Tal direcionamento deixa de aproveitar grandes oportunidades de economia de energia, dado que o potencial de conservação na área térmica (fornos, secadores e caldeiras a combustão) é quatro vezes maior que o potencial na área elétrica (iluminação, eletrólise, fornos

elétricos, refrigeração e força motriz).

Como parte do programa proposto, a FIGENER desenvolveu, em conjunto com a CNI e a ABRACE (Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres), o conceito de uma metodologia de medição e verificação (M&V) com objetivo de comprovar as economias de energéticos (combustível e energia elétrica) e a respectiva redução de emissão de gases de efeito estufa nas ações de eficiência energética na indústria. A metodologia tem foco nas ações aplicadas aos seguintes equipamentos:

- Conjuntos de tração (motores elétricos, acoplamentos e inversores de frequência)
- Bombas hidráulicas
- Caldeiras
- Fornos a combustão
- Secadores
- Eletrólise.

Adotou-se o IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) como diretriz para a metodologia. Esta escolha se deve ao fato de que este protocolo já é amplamente usado em programas de M&V no mundo. Além disso, o IPMVP já possui versão em português e existem treinamentos e certificações de profissionais no Brasil.

O capítulo 2 deste relatório apresentará alguns conceitos e terminologias do IPMVP. O capítulo 3 apresentará o conceito da metodologia proposta e o capítulo 4 as suas particularidades para cada grupo de equipamentos. No capítulo 5 são listadas as referências utilizadas pela FIGENER durante a elaboração do trabalho e o anexo apresenta uma visão geral de programas de M&V utilizados internacionalmente.

2. TERMINOLOGIA DO IPMVP

O International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) é uma abordagem padronizada de medição e verificação (M&V) para economia de energia e água, internacionalmente aceita e criada pela Energy Valuation Organization (EVO), uma corporação sem fins lucrativos, que teve início com um grupo de voluntários do US Department of Energy (DOE) e do Lawrence Berkeley National Laboratory (Estados Unidos) em 1994.

Este protocolo é usado como base de programas de eficiência energética e guias de M&V em mais de 40 países. Alguns usuários do IPMVP são: o Federal Energy Management Program (FEMP), a Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) nos Estados Unidos; a Agência para a Energia (ADENE) em Portugal; o Energy Savings Measurement Guide do Energy Efficiency Opportunities (Austrália), SGS-CSTC Standards Technical Services Co., Ltd. (Suíça e China) e HEP ESCO d.o.o. (Croácia). Além disso, existem treinamentos e certificações a profissionais em todo o mundo (Certified Measurement and Verification Professionals - CMVP). (Fonte: <http://eetd.lbl.gov/bt/design-assess-ipmvp.html>).

É possível encontrar uma lista de documentos que referencia o uso do IPMVP em programas de eficiência ou como modelo de boas práticas de M&V no seguinte link:

http://www.evo-world.org/index.php?option=com_content&task=view&id=230&Itemid=251

Os seguintes tópicos são abordados pelo IPMVP

1. Escopo, benefícios e usos do protocolo
2. Descrição das opções de fronteira de medição
3. Cálculos das economias
4. Plano de M&V
5. Relatório de M&V
6. Ajustes e incertezas
7. Normas para instrumentos e leituras de medições
8. Exemplos de aplicação

Abaixo segue um resumo de alguns termos aplicados ao IPMVP:

Fronteira de medição: é o volume no qual será calculada a economia e serão contabilizados os efeitos energéticos, sendo que todos os efeitos da ação de eficiência energética devem ser considerados.

Variáveis independentes: variável que pode se alterar durante a operação e que causa impacto significativo no consumo específico do equipamento. Exemplo: umidade de entrada do produto em um secador.

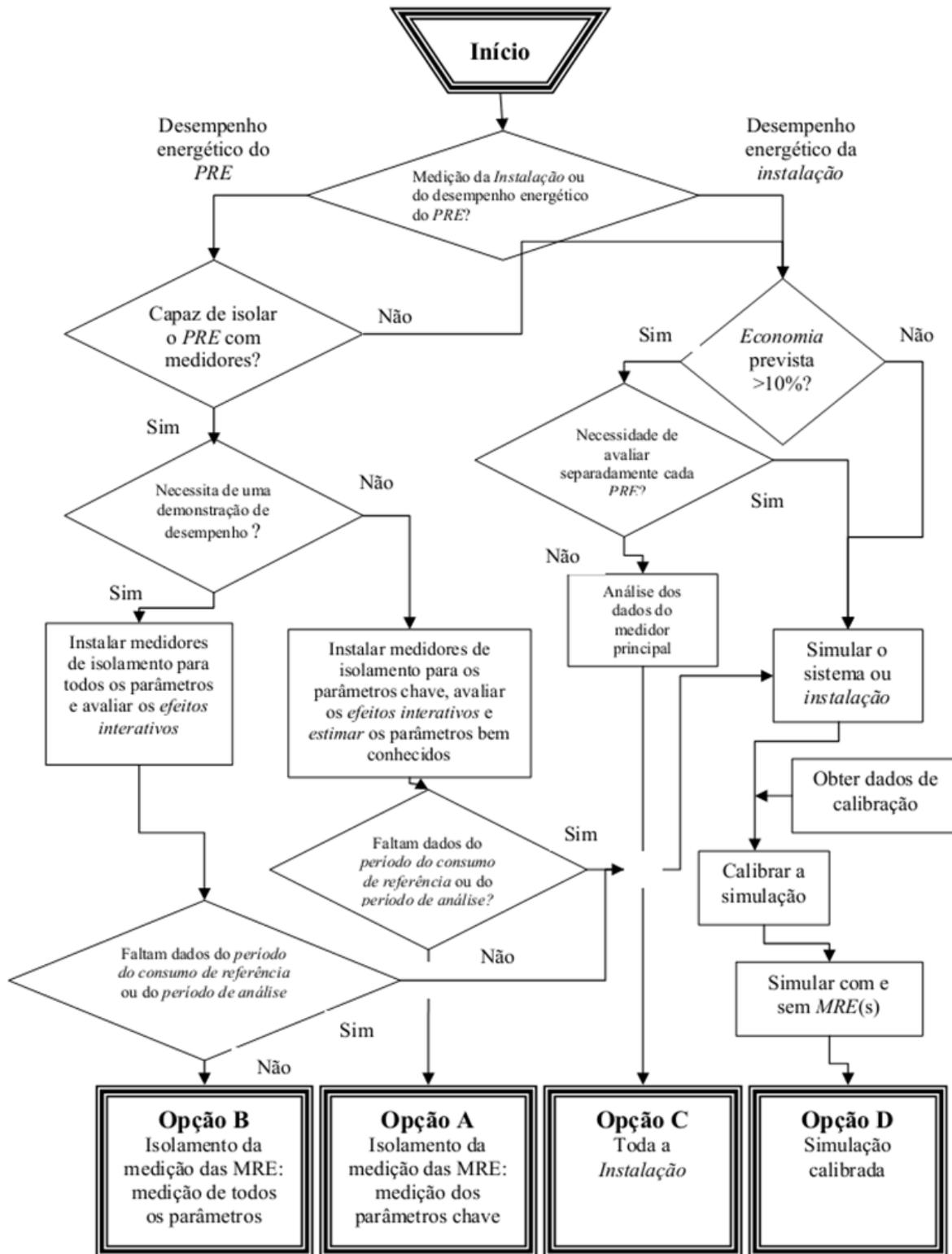
Opções de cálculo: O IPMVP apresenta 4 opções (A, B, C, D) de aplicações de procedimentos para um processo de M&V, que dependem do volume de controle escolhido, das medições e estimativas feitas.

Tanto na opção A quanto na B, o volume de controle é o equipamento em que foi implantada alguma ação para economia de energia, o que as difere é que na primeira, apenas parâmetros chave para o cálculo dessa economia são medidos, sendo os demais estimados, enquanto na segunda, todos devem ser medidos.

A opção C tem como volume de controle a instalação inteira, englobando várias ações de eficiência energética, e não há estimativas de parâmetros. Geralmente usada quando há muitas ações e as opções A ou B seriam complexas demais.

Por fim, a opção D serve para simulações, quando a energia no período de referência ou no pós-execução é desconhecida. Também é usada quando se quer a economia individual de equipamentos com medição conjunta. Pode englobar qualquer volume de controle, e é comumente realizada quando nenhuma das outras opções é viável.

FIGURA 1 - ÁRVORE DE DECISÃO SOBRE AS OPÇÕES DO IPMVP



Fonte: VERSÃO BRASILEIRA DO IPMVP 2007, VOLUME 1, PÁG. 56

Efeitos interativos: são elevações ou reduções secundárias de consumo energético, resultantes de uma ação de eficiência energética, que também devem ser consideradas no cálculo da economia total.

Seleção do período de medição: devem ser definidos dois períodos, um antes do retrofit (período de referência) e outro depois (período de relato).

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos de uma metodologia de medição e verificação da economia de energia, seja ela térmica ou elétrica, obtida por meio de uma ação de melhoria de eficiência energética para os grupos de equipamentos selecionados.

O cálculo da economia é baseado no método do “Uso Evitado de Energia”, definido no item 4.6.1 do IPMVP. O consumo evitado é a diferença entre a energia que o equipamento iria consumir caso não houvesse a ação de eficiência e a energia efetivamente consumida após a implantação da medida.

No cálculo, devem-se levar em conta os diversos fatores que interferem no rendimento de um equipamento, definidos no IPMVP como “variáveis independentes”. Alguns exemplos:

- Variações na produção (carga do equipamento)
- Qualidade/composição dos produtos ou matérias-primas
- Condições ambientais.

O modelo deverá, portanto, possuir recursos que evitem que variações nesses fatores resultem em falsas economias ou elevação de consumo específico.

Para eliminar os possíveis erros causados pela variação de carga do equipamento, as comparações entre as condições de referência (pré-execução da ação de eficiência) e de pós-execução serão feitas sempre em mesma carga. Por isso será sempre necessário que o período de referência possua o ciclo completo de operação do equipamento, desde a carga mínima até a máxima.

Com relação às demais variáveis independentes, para que suas variações não resultem em erro na economia, as comparações também deverão ser feitas sempre em mesma base. Desse modo, essas variáveis também devem ser monitoradas.

3.1 ETAPAS DO PROCESSO

A primeira etapa do processo consiste no planejamento, onde, dentre outras coisas, são definidas as variáveis a serem medidas e o período de referência.

A próxima etapa corresponde à coleta de dados do período de referência. Nela são medidos e registrados os consumos de energia elétrica e combustíveis, as produções e as demais variáveis independentes que variam caso a caso. O período de referência é dividido em pequenos intervalos e o valor registrado das variáveis será a média de cada um deles. Cada intervalo é definido como um ponto de operação.

Com os diversos pontos de operação do período de referência, traça-se uma curva e obtém-se uma equação de consumo médio em função da produção do equipamento. Com essa equação é possível determinar, para as futuras produções, qual seria o consumo do equipamento caso não houvesse a ação de eficiência energética. No caso de existirem consumos térmico e elétrico, uma equação para cada um deles deverá ser construída.

As equações também podem ser construídas como consumo específico médio em função da produção. Isto porque, para muitos equipamentos, é mais comum o uso de consumo específico ao invés de consumo absoluto. O consumo específico é:

$$C.E. = (\text{Consumo de Energia})/\text{Produção}$$

Depois de realizado o registro do período de referência, a ação de eficiência energética pode ser implantada. Na sequência é realizado o levantamento de dados do período pós-execução, onde, novamente, são medidos e registrados os consumos de energéticos, produções e demais variáveis independentes.

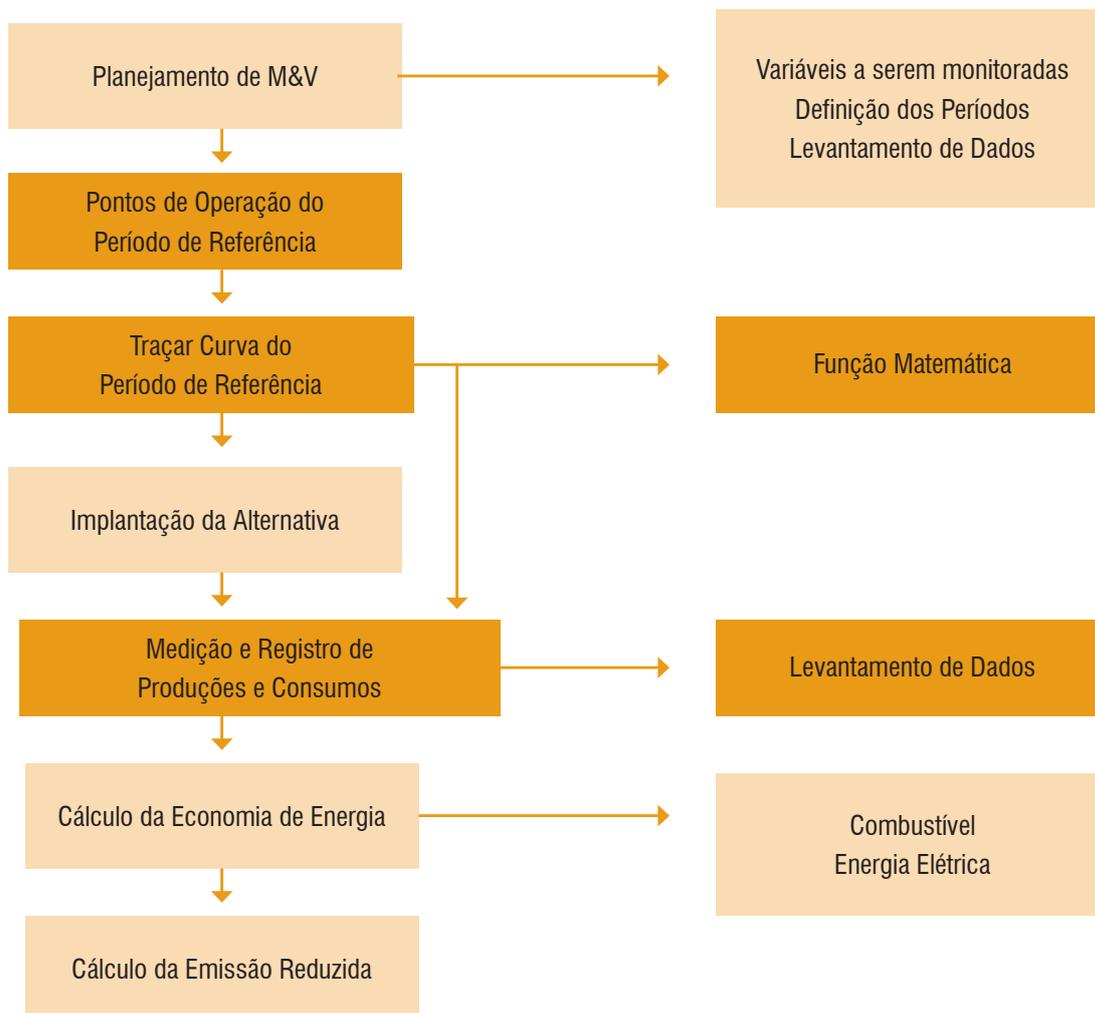
Com as produções do período pós-execução e com as equações de consumo em função da produção do período de referência é possível calcular o consumo teórico que o equipamento teria caso não houvesse a ação de eficiência energética. Subtraindo-se desse valor o consumo real medido, obtém-se a economia.

Caso existam, além da produção, outras variáveis independentes com impacto no consumo específico do equipamento, os pontos de operação do período de referência e do período de pós-execução devem ser reunidos em grupos onde elas estão fixas. Com isso, será possível comparar condições de operação cujas variáveis são iguais.

O último passo do processo é calcular o impacto da economia de energéticos nas emissões de gases de efeito estufa utilizando-se de fatores de emissão conhecidos.

A figura a seguir apresenta todas as etapas do processo de M&V:

FIGURA 2 - RESUMO DA METODOLOGIA PROPOSTA



Fonte: Elaboração Própria

Ao final do processo, caso seja verificada uma redução de consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa, recomenda-se que as informações sejam levadas à equipe de gestão econômica da empresa para que o resultado seja então oficializado. Se, por outro lado, não ocorrer redução, significa que a medida de eficiência energética não funcionou como o previsto. Não houve uma redução no consumo específico do equipamento. Neste caso, a medida deverá ser revista, corrigindo-se as falhas, para então o processo de medição e verificação ser refeito. Para isso, uma nova medição do período de pós-execução será necessária.

Todo o processo deverá ser auditado por empresas de engenharia ou ESCOs (Energy Services Company) credenciadas pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e que possuam a certificação do IPMVP. Nos próximos itens deste capítulo serão detalhadas as etapas do processo.

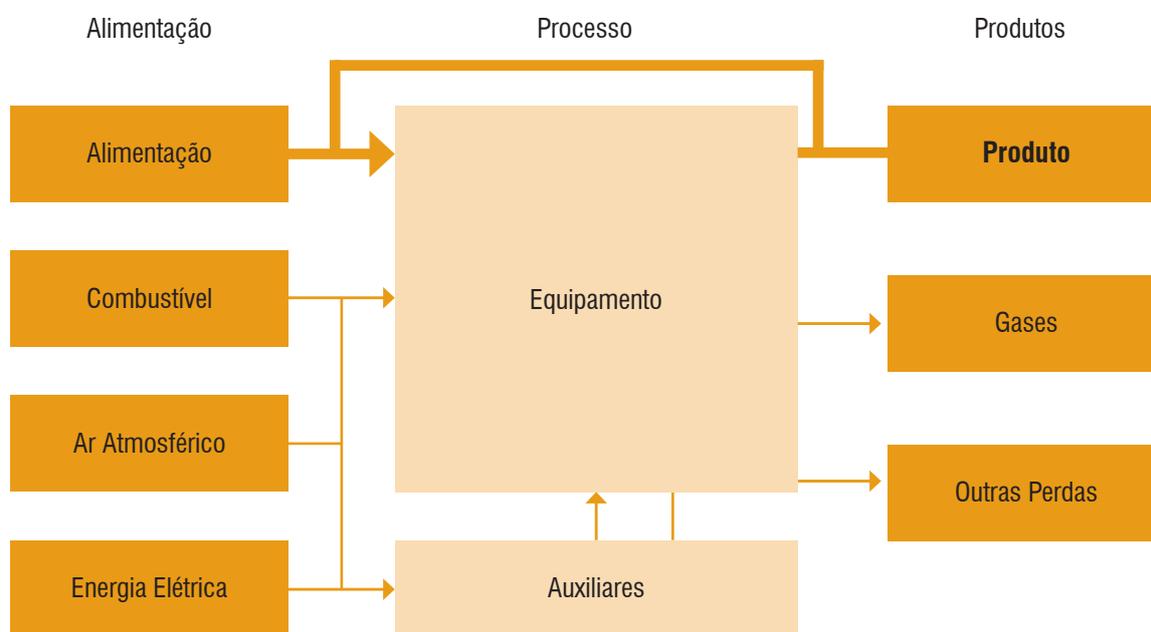
3.2 PLANEJAMENTO

O processo deve partir de um planejamento que, dentre outras coisas, deve incluir os seguintes tópicos:

3.2.1 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE MEDIÇÃO

O primeiro passo para se planejar o processo de M&V é a definição de um limite de medição em torno do equipamento alvo da ação de eficiência energética e eventuais auxiliares que serão influenciados pela medida. Com isso será possível verificar quais são os aportes energéticos e produções a serem monitorados e especificar medidores nos casos em que eles não existiam.

FIGURA 3 DEFINIÇÃO DO LIMITE DE MEDIÇÃO



Fonte: Elaboração Própria

3.2.2 VERIFICAÇÃO DE EFEITOS INTERATIVOS

Deve-se investigar a existência de alterações secundárias de consumos em equipamentos que se encontram fora do limite de medição, mas que podem estar sendo influenciados pela ação de eficiência energética. Caso existam, as alterações de consumo também deverão ser consideradas e, portanto, monitoradas.

Por exemplo: Em uma determinada fábrica, o minério produzido na lavra é enviado a um secador e posteriormente a um forno de redução. Os gases de escape do forno, a uma temperatura de 450°C, são aproveitados na secagem, fornecendo um aporte térmico que impacta em seu consumo de combustível. Nesta unidade, qualquer medida de eficiência energética que seja realizada no forno e que reduza a vazão dos gases de escape terá efeito (neste caso negativo) no consumo do secador.

3.2.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES A SEREM MONITORADAS

Devem-se definir as variáveis independentes, ou seja, quais parâmetros que quando são alterados modificam o consumo específico do equipamento. Por exemplo: umidade do produto na entrada de um secador, temperatura da matéria-prima na entrada de um forno, etc.

Essa análise é necessária para que se definam quais parâmetros serão medidos e registrados, além dos consumos de energéticos e produção (que sempre deverão ser medidos).

No capítulo 4, serão discutidas as principais possíveis variáveis independentes dos equipamentos

selecionados.

3.2.4 DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS DE REFERÊNCIA E PÓS-EXECUÇÃO

De acordo com o IPMVP, o período de referência deve representar todos os modos de funcionamento da instalação, encobrendo um ciclo completo de funcionamento, que englobe do máximo consumo energético ao mínimo e todas as condições normais de operação e no qual todos os fatores, variáveis ou fixos, dos quais depende a energia sejam conhecidos. O período de referência deve, ainda, possuir uma quantidade de amostras suficiente para que o critério de erro padrão definido no item 3.4.1.3 seja satisfeito.

O período pós-execução também deve conter um ciclo completo de operação, e deve levar em consideração a vida útil e a probabilidade de depreciação das economias originalmente obtidas.

3.3 COLETA DE DADOS E DEFINIÇÃO DE EQUAÇÃO DO PERÍODO DE REFERÊNCIA

Os consumos do período de referência é que servirão de base para o cálculo da energia teórica que o equipamento consumiria caso não houvesse a ação de eficiência energética. Para isso, é necessário que se obtenha uma equação de consumo médio em função da produção. Por meio dessa equação e das produções do período pós-execução, é que será calculada a energia teórica. Quando existem tanto consumo térmico quanto consumo de energia elétrica, deve-se criar uma equação para cada um deles. Enquanto o consumo elétrico é obtido diretamente pela medição, o consumo térmico é calculado multiplicando-se a massa de cada combustível pelo respectivo PCI (poder calorífico inferior).

$$\text{Consumo Energético Térmico} = m_{(\text{comb.})} \cdot (\text{PCI})$$

Existe a opção de se definir equações de consumo específico médio em função da produção. Em muitos equipamentos é mais usual se trabalhar com consumo específico ao invés de consumo absoluto. Neste caso, o cálculo pode ser feito por meio da seguinte equação:

$$\text{C.E.} = (\text{Consumo Energético}) / \text{Produção}$$

Caso existam variáveis independentes com impacto significativo no consumo do equipamento, será necessário dividir o período de referência em grupos. Em cada um desses grupos a variável deverá permanecer constante (ou estar dentro de uma faixa). Será então definida uma equação para cada grupo.

Todas as comparações de consumo deverão ser feitas respeitando essa divisão de grupos. Desse modo, o período de pós-execução também deverá ser dividido nos mesmos grupos.

3.3.1 OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONSUMO EM FUNÇÃO DA PRODUÇÃO

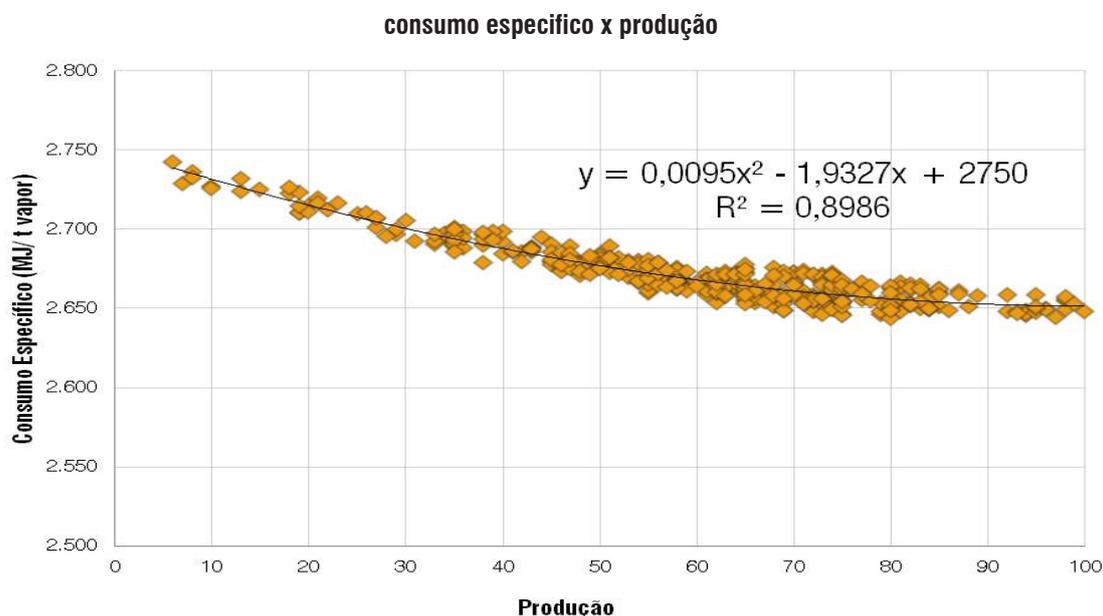
Para a caracterização do período de referência, deve-se fazer um levantamento de dados. Nele deverão ser coletados os consumos de combustíveis, energia elétrica, produção e demais variáveis independentes.

O período de referência é dividido em pequenos intervalos e o valor registrado das variáveis será a média de cada um deles. Cada intervalo é definido como um ponto de operação. A quantidade de pontos dependerá do ciclo de operação do equipamento.

A partir dos pontos de operação levantados, é traçada a curva do período de referência. Devem

ser utilizados os métodos de regressão para a curva que melhor represente a característica do equipamento, tentando-se maximizar o coeficiente de determinação R^2 , que, para validar o modelo, deverá ser superior a 0,75, conforme item 3.4.1..A figura abaixo apresenta um exemplo:

FIGURA 4 - EXEMPLO DE REGRESSÃO PARA APROXIMAR OS PONTOS DE OPERAÇÃO A UMA CURVA



Fonte: Elaboração Própria

A geração de curva é feita utilizando uma função matemática obtida pela regressão mais apropriada, podendo ser linear, logarítmica, polinomial. É possível ainda dividir o eixo da ordenada em trechos onde será traçada uma função diferente para cada região de modo a melhorar a aderência do modelo matemático.

3.3.2 VALIDAÇÃO DO PERÍODO DE REFERÊNCIA

De acordo com o IPMVP, para se validar estatisticamente uma economia, o cálculo deve incluir seus intervalos de confiança e precisão. A economia calculada deve ser maior que duas vezes o erro padrão do período de referência (ver item 3.4.1).

Desse modo, durante o planejamento, deve-se fazer uma estimativa da economia esperada e calcular o erro padrão do período de referência. Caso o critério não esteja sendo satisfeito, as seguintes medidas deverão ser consideradas:

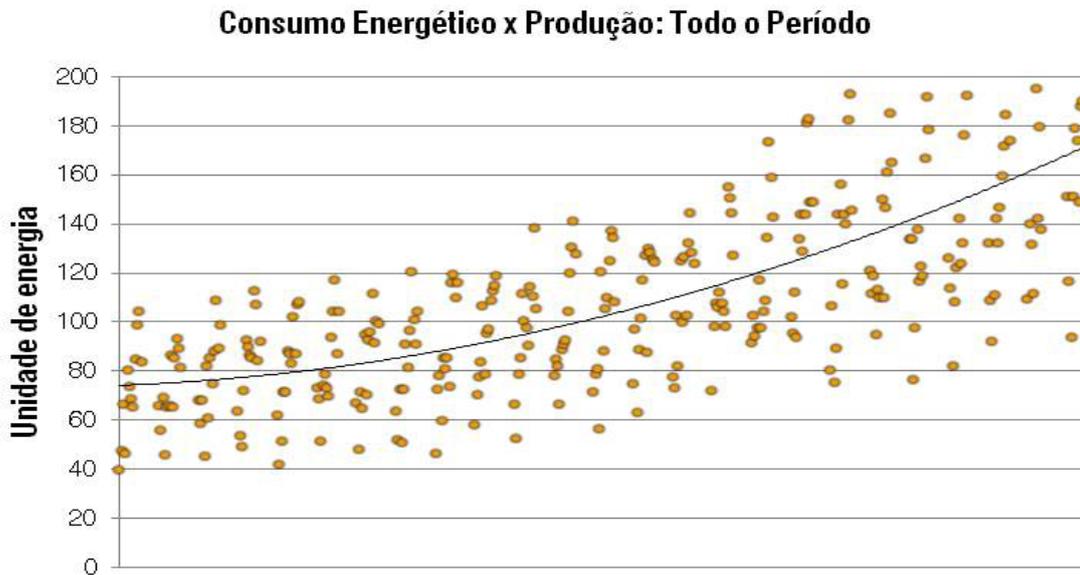
1. Elevar a amostragem do período de referência
2. Utilizar instrumentos mais precisos para reduzir o grau de variação das medições;
3. Identificar outras variáveis independentes que podem estar influenciando o consumo do equipamento e que não estejam sendo levadas em consideração.

Caso seja identificada uma nova variável independente, com influência no consumo do equipamento (item 3), o período de referência deve ser dividido em grupos onde, em cada um deles, esta variável é constante (ou apresenta variação pequena).

Por exemplo: Em uma unidade, está sendo prevista uma ação de eficiência energética em um secador. No período de pré-execução (referência), levantaram-se os dados de consumo e produção do equipamento. Verifica-se que, para uma dada produção, existe uma faixa muito grande de consumos. Isto leva a um desvio padrão elevado e, conseqüentemente, a um erro padrão alto, que fará com que

o critério não seja satisfeito. A figura abaixo apresenta os pontos de operação levantados:

FIGURA 5 - PONTOS DE OPERAÇÃO DO PERÍODO TOTAL DE REFERÊNCIA



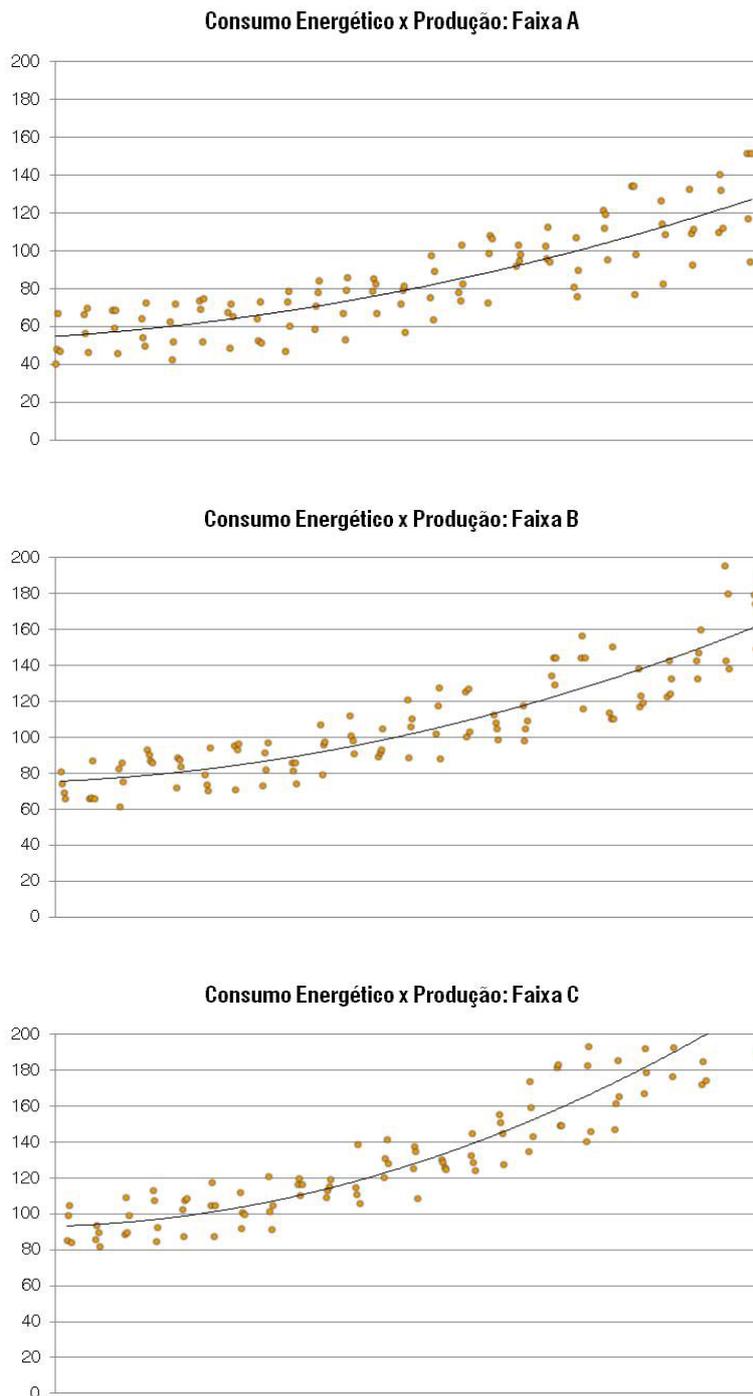
Fonte: Elaboração Própria

Após uma análise feita em conjunto com as equipes de processo e operação, concluiu-se que havia uma variável que possui grande impacto no consumo do equipamento e que não estava sendo considerada: a umidade de entrada da matéria-prima no secador. Deste modo, para reduzir o erro padrão do período de referência, decidiu-se por dividi-lo em três grupos:

1. No primeiro foram colocados os pontos de operação onde a umidade de entrada do secador estava na faixa de 12% a 15%.
2. No segundo: 15% a 18%.
3. No terceiro: 18% a 21%.

Com isso, pode-se reduzir o desvio padrão e o erro padrão das amostras, conforme pode ser percebido da figura a seguir:

FIGURA 6 - PERÍODO DE REFERÊNCIA DIVIDIDO EM GRUPOS



Fonte: Elaboração Própria

3.4 LEVANTAMENTO DE DADOS DO PÓS-EXECUÇÃO E CÁLCULO DA ECONOMIA DE ENERGIA

Após a implantação da medida de eficiência energética, inicia-se a etapa de levantamento de dados do período pós-execução, que, assim como o período de referência, também deve conter um ciclo completo de operação. Ele deve ainda levar em consideração a probabilidade de diminuição das

economias originalmente obtidas, ou seja, a verificação deverá se repetir ao longo dos anos.

Os dados levantados deverão ser os mesmos do período de referência: consumos de combustíveis, energia elétrica, produção e demais variáveis independentes.

O próximo passo será calcular a energia teórica que o equipamento consumiria caso ele não tivesse sido submetido à ação de eficiência energética. Isto é feito substituindo-se as produções do período de pós-execução na equação de consumo em função da produção, definida no período de referência. No caso de existirem tanto consumo elétrico quanto térmico, esse procedimento deve ser realizado para cada um deles.

Se a equação utilizada foi a de consumo específico, ao invés de se obterem os consumos teóricos de cada ponto de operação, serão obtidos os consumos específicos. Neste caso, deve-se ainda multiplicá-los pela respectiva produção.

$$\text{Consumo de Energia.} = \text{C.E.} \cdot \text{Produção}$$

Nos casos onde existem variáveis independentes com influência no consumo do equipamento, o período de referência terá sido dividido em grupos. Esses grupos terão sido formados levando em conta o valor dessas variáveis. Em cada um deles serão agrupados os pontos de operação cujo valor da variável esteja dentro de uma determinada faixa. Como resultado, haverá uma equação para cada grupo. Da mesma forma, o período de pós-execução também deverá ser dividido para que a comparação seja realizada em mesma base. O critério de divisão de grupos deverá ser o mesmo do período de referência, ou seja, os valores da variável independente. No momento em que for feita a substituição das produções do período de pós-execução na equação de consumo do período de referência, deve-se usar a do grupo correspondente, com mesma faixa de valor para a variável independente.

Depois de calculada a energia teórica que o equipamento iria consumir sem a ação de eficiência energética, calcula-se a economia subtraindo-se deste valor a energia real medida.

3.4.1 INCERTEZAS DO CÁLCULO

Segundo o IPMVP¹, “Para poder comunicar uma economia de uma forma estatisticamente válida, a economia deve ser expressa juntamente com os seus intervalos de confiança e precisão”

A precisão indica a faixa esperada que o valor verdadeiro ocorra dado um determinado intervalo de confiança. Ela é calculada a partir de um erro padrão² EP e de um fator estatístico “t” que considera o intervalo de confiança e o número de leituras realizadas, obtido do Quadro B-1 do Anexo B do IPMVP, mostrada na figura abaixo. A equação da precisão é:

$$\text{Precisão absoluta} = t \times \text{EP}$$

¹ IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol), Anexo B – Incerteza.

² Ver item 3.4.1.1

FIGURA 7 - QUADRO T

NUMERO DE LEITURAS (TAMANHO DA AMOSTRA)	INTERVALO DE CONFIANÇA				NUMERO DE LEITURAS (TAMANHO DA AMOSTRA)	INTERVALO DE CONFIANÇA			
	95%	90%	80%	50%		95%	90%	80%	50%
2	12,71	6.31	3.08	1.00	17	2.12	1.75	1.34	0.69
3	4.30	2.92	1.89	0.82	18	2.11	1.74	1.33	0.69
4	3.18	2.35	1.64	0.76	19	2.10	1.73	1.33	0.69
5	2.78	2.13	1.53	0.74	20	2.09	1.73	1.33	0.69
6	2.57	2.02	1.48	0.78	21	2.09	1.72	1.33	0.69
7	2.45	1.94	1.44	0.72	22	2.08	1.72	1.32	0.69
8	2.36	1.89	1.41	0.71	23	2.07	1.72	1.32	0.69
9	2.31	1.86	1.40	0.71	24	2.07	1.71	1.32	0.69
10	2.26	1.83	1.38	0.70	25	2.06	1.71	1.32	0.68
11	2.23	1.81	1.37	0.70	26	2.06	1.71	1.32	0.68
12	2.20	1.80	1.36	0.70	27	2.06	1.71	1.31	0.68
13	2.18	1.78	1.36	0.70	28	2.05	1.70	1.31	0.68
14	2.16	1.77	1.35	0.69	29	2.05	1.70	1.31	0.68
15	2.14	1.76	1.35	0.69	30	2.05	1.70	1.31	0.68
16	2.13	1.75	1.34	0.69	∞	1.96	1.64	1.28	0.67

Fonte: Anexo B do vol I do IPMVP – versão 2007 (BR)

3.4.1.1 ERRO PADRÃO

Os erros padrões podem ser originados de erros de amostragem, de medição ou de modelagem. A definição de cada um é mostrada abaixo:

1. Amostragem – Erro resultante da utilização de amostras com apenas uma parte da população. Como por exemplo, em um caso onde existem 40 motores elétricos iguais, substituídos por modelos mais eficientes, e que o processo de medição foi realizado em apenas uma amostra de 10 motores. O erro padrão é dado por:

$$EP_{amostragem} = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\sqrt{\text{número de pontos amostrados}}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum(Y_i - Y_{\text{médio}})^2}{n - 1}}}{\sqrt{n}}$$

2. Medição - Erros devido à imprecisão da instrumentação. Podem ser minimizados com o uso de instrumentos mais precisos e calibrações frequentes. O erro padrão de uma medição é dado pela equação B-13 do IPMVP:

$$EP_{medição} = \frac{\text{precisão relativa do medidor} \cdot \text{valor medido}}{t (= 1,96)}$$

3. Modelagem - Erros relacionados ao modelo matemático desenvolvido, sendo que algumas causas de erro são: a função matemática (regressão) não representar bem o fenômeno; incluir variáveis irrelevantes ou omitir uma importante; dados utilizados não serem representativos. O erro padrão para Erro padrão da estimativa (equação B-8 do IPMVP) é calculado a partir dos dados utilizados

para a regressão e a curva gerada:

$$EP_{modelagem} = \sqrt{\frac{\sum(Y_{regressão} - Y_i)^2}{n - p - 1}}$$

$Y_{regressão}$ é o valor estimado pela regressão;

Y_i é o valor do dado medido, utilizado para se realizar a regressão;

p é o número de variáveis independentes.

O coeficiente de determinação (R^2) representa a aderência da regressão em relação aos pontos observados. Deste modo é preciso buscar a função com o maior coeficiente de determinação (R^2) possível. Não existe um valor universal de valor mínimo de R^2 , entretanto o próprio IPVMP informa que 0,75 é um valor que é frequentemente aceito.

Para se calcular o erro padrão (EP) total é necessário combinar cada um dos erros supracitados:

$$EP_{total} = \sqrt{(EP_{amostragem})^2 + (EP_{medição})^2 + (EP_{modelagem})^2}$$

3.4.1.2 CÁLCULO DA PRECISÃO DA ECONOMIA

A economia é calculada por:

$$\text{Economia Total} = \sum \text{Economias}_i$$

Onde, para cada intervalo i :

$$\text{Economias}_i = \text{Consumo Teórico}_i - \text{Consumo Real}_i$$

Temos que a equação do seu erro padrão (EP), para cada intervalo i , é:

$$EP_{econ_i} = \sqrt{EP_{teórico}^2 + EP_{real}^2}$$

onde,

- EP_{econ_i} : erro padrão do i -ésimo ponto de economia;
- $EP_{teórico_i}$: erro padrão do Consumo Teórico no i -ésimo ponto, que está atrelado ao erro do modelo, que é o erro padrão da estimativa;
- EP_{real_i} : erro padrão do Consumo Real no i -ésimo ponto, que está atrelado ao erro do medidor.

No caso da utilização de Consumo Específico ao invés de Consumo, é necessário ainda realizar um passo a mais no cálculo do erro padrão, pois:

$$\text{Consumo Teórico}_i = CE_i \times \text{produção}_i$$

Neste caso, o cálculo do erro padrão do valor estimado é dado por:

$$EP_{teórico_i} = \text{consumo}_i \cdot \sqrt{\frac{EP_{CE}^2}{CE_i} + \frac{EP_{produção}^2}{\text{produção}_i}}$$

Onde,

- CE_i : consumo específico da condição de referência para a produção do i -ésimo ponto
- $prod_i$: produção real no i -ésimo ponto

Finalmente, o erro padrão da economia total é calculado por:

$$EP_{econ} = \sqrt{\sum_i EP_{econ_i}^2}$$

A partir do EP_{econ} e do t obtido na tabela da figura 7, que depende intervalo de confiança desejado e do número de pontos observados, é calculada a precisão absoluta da economia:

$$\text{Precisão} = t \times EP_{econ}$$

3.4.1.3 VALIDAÇÃO DA ECONOMIA

Conforme IPMVP, “A economia é considerada estatisticamente válida se for grande relativamente às variações estatísticas. Especificamente, a economia precisa ser maior do que duas vezes o erro padrão do valor do período de referência.”

O erro padrão do valor do período de referência é o erro padrão do consumo teórico mostrado no item anterior.

$$EP_{\text{valor do período de referência}} = EP_{\text{consumo teórico de referência}} = \sqrt{\sum_i EP_{\text{consumo teórico}_i}^2}$$

Caso a economia seja composta por consumos térmicos e elétricos, o erro padrão do consumo total é dado por:

$$EP_{\text{consumo teórico total}} = \sqrt{EP_{\text{consumo teórico térmico}}^2 + EP_{\text{consumo teórico elétrico}}^2}$$

3.4.1.4 INSTRUMENTOS TÍPICOS

A seguir será apresentada uma lista contendo a precisão típica de diversos tipos de medidores, usada no cálculo da incerteza. A lista, que foi adaptada do IPMVP, tem caráter orientativo e as precisões reais dos instrumentos devem ser obtidas junto aos fabricantes.

TABELA 1 - QUADRO DE INSTRUMENTOS ADAPTADO DO QUADRO 5 – TIPOS DE MEDIDORES CHAVES DO IPMVP

APLICAÇÃO	CATEGORIA E TIPO DE MEDIDOR	PRECISAO TIPICA
potencia elétrica CA (watt) ou energia CA (waththora)	Wattímetro rms ou medidor de energia	±0.2%
temperatura (graus)	detector de resistência de temperatura	por norma sensor Pt 100: classe B: erro máx. = ±0.3 + 0.005T [°C] classe A: erro máx. = ±0.15 + 0.002T [°C]
	termopar	<0.75% para temperaturas acima de 0°C
fluxo líquido (unidades/seg)	pressão diferencial	1-5% do max.
	deslocamento positivo	<1%
	turbina ou turbina de inserção de derivação a quente	<1%
	vortex	±1%
	ultrasônico	<1%
	magnético	<2%
produção - sólido	alimentador tipo cinta	0.5 a 1.0% do máx
	alimentador gravimétrico	0.5 a 1.0% do máx
	tipo "loss in weight"	±1%
poder calorífico do combustível	calorímetros diversos (ex.: cromatografia)	0.5 a 2.0% do máx
umidade do produto	medidores nuclear, capacitivo, resistivo	<2.0% do máx

Fonte: Quadro 5 – Tipos de medidores chaves do vol.I do IPMVP – versão 2007 (BR)

3.5 CÁLCULO DAS EMISSÕES EVITADAS

O cálculo das emissões evitadas de gases de efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O) será realizado por meio da quantificação da economia de combustível e energia elétrica resultantes da implantação de uma medida de eficiência energética.

Serão contabilizadas apenas as emissões correspondentes à quantidade de energéticos não consumidos. Desse modo, não serão consideradas, no cálculo, eventuais reduções referentes ao transporte de bens e produtos.

A emissão evitada de gases de efeito estufa (GEE) será calculada pela multiplicação da economia energética pelo respectivo fator de emissão.

3.5.1 EMISSÕES EVITADAS RESULTANTES DA ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

As emissões evitadas, resultantes da economia de combustíveis, serão calculadas pela seguinte equação:

$$Emiss\tilde{a}o\ evitada_{GEE} = Economia\ de\ combust\tilde{v}el \times fator\ de\ emiss\til{a}o$$

A redução de emissão de cada GEE será calculada separadamente e, por fim, convertida na equivalência em dióxido de carbono (CO_{2eq}) com base nos potenciais de aquecimento global de cada gás.

O fator de emissão utilizado na equação acima deverá expressar, tanto quanto possível, as condições reais de emissão de GEE do processo/equipamento em estudo, de forma a minimizar as incertezas.

Caso o usuário não possua fatores de emissão próprios e certificados, obtidos por meio das medições de gases na chaminé e/ou composição química do combustível, poderá utilizar os fatores disponibilizados pelo Programa Brasileiro GHG Protocol.³

O Programa Brasileiro GHG Protocol disponibiliza fatores padrão de emissão médios do IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) e da EPA (United States Environmental Protection Agency) para combustíveis no caso de combustão estacionária. Em alguns casos, os fatores de emissão são adaptados ao contexto nacional, como no caso da porcentagem de biodiesel presente no óleo diesel. A tabela abaixo apresenta os fatores de emissão para alguns combustíveis.

TABELA 2 - FATORES DE EMISSÃO PARA COMBUSTÍVEIS E RESPECTIVOS POTENCIAIS DE AQUECIMENTO

COMBUSTÍVEL	SETOR	KG CO ₂ /TJ	KG CH ₄ /TJ	KG N ₂ O/TJ
Óleo combustível	industrial	74.100	3	0.6
Gás natural	industrial	56.100	1	0.1
Coque de petróleo	industrial	97.500	3	0.6
Madeira	industrial	112.000	30	5
Licor negro	industrial	95.300	3	2

Fonte: dados obtidos do Programa Brasileiro GHG Protocol

3.5.2 EMISSÕES EVITADAS RESULTANTES DA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA

A estimativa da redução das emissões de GEE procedentes da economia de energia elétrica seguirá a metodologia AMS-I.D.⁴. Desse modo, as emissões evitadas serão calculadas pela seguinte equação:

$$\text{Emissão evitada} = \text{Economia de energia elétrica} \times \text{Fator de emissão}_{\text{elétrico}}$$

Os fatores de emissão de CO₂ pela compra de energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN) são publicados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), e são calculados de acordo com a ferramenta metodológica aprovada pelo Conselho Executivo do MDL.

O fator de emissão elétrico ($EF_{\text{grid,CM,y}}$) é composto pela combinação do fator de emissão da margem de operação ($EF_{\text{grid,OM,y}}$) e do fator de emissão da margem de construção ($EF_{\text{grid,BM,y}}$). O fator de emissão da margem de operação considera que a energia seria procedente das usinas marginais que constituem o SIN. Já o fator de emissão da margem de construção representa a expansão do sistema elétrico, conectado ao SIN, considerando a construção de novas usinas conforme a tendência de construção observada. A composição é realizada da seguinte forma:

$$EF_{\text{grid,CM,y}} = EF_{\text{grid,OM,y}} \times W_{\text{OM}} + EF_{\text{grid,BM,y}} \times W_{\text{BM}}$$

Onde:

- W_{OM} : peso do fator de emissão da margem de operação;
- W_{BM} : peso do fator de emissão da margem de construção.

³ O GHG Protocol é uma ferramenta utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEE. Este programa é desenvolvido pelo GVces (Centro de Estudos em Sustentabilidade) da Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas e pelo WRI (World Resources Institute) em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, com o CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável), com o WBSCD (World Business Council for Sustainable Development) e 27 Empresas Fundadoras
⁴ Metodologia aprovada para projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), disponibilizada pela United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

Por definição da metodologia AMS-I.D, os valores de WOM e WBM são iguais a 0,50 para o primeiro ano após a implantação.

Como exemplo, será calculado a seguir o fator de emissão para o ano de 2010. A figura a seguir apresenta os fatores de emissão de CO₂ da margem de operação e construção referentes àquele ano, disponibilizados pelo MCT.

FIGURA 8 - FATORES DE EMISSÃO DA MARGEM DE OPERAÇÃO E DA MARGEM DE CONSTRUÇÃO.

MARGEM DE CONSTRUÇÃO												
fator de emissão medio (tCO ₂ /MWh) - ANUAL												
2010	0.1404											
MARGEM DE OPERAÇÃO												
fator de emissão medio (tCO ₂ /MWh) - MENSAL												
MÊS												
2010	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro
	0.2111	0.2798	0.2428	0.2379	0.3405	0.4809	0.4347	0.6848	0.7306	0.7320	0.7341	0.6348

Fonte: dados obtidos do Programa Brasileiro GHG Protocol

O cálculo do fator de emissão de CO₂ da margem combinada é dado pela tabela abaixo.

TABELA 3 - CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÃO DE CO₂ DA MARGEM COMBINADA DO SIN

Fator de emissão margem de operação (média anual)	0,4787	tCO ₂ /MWh
Fator de emissão margem de construção	0.1404	tCO ₂ /MWh
Peso do fator de emissão da margem de operação	0.50	-
Peso do fator de emissão da margem de construção	0.50	-
Fator de emissão da margem combinada	0.3095	tCO ₂ /MWh

Fonte: MCT



4. PARTICULARIDADES DAS CLASSES DE EQUIPAMENTOS

Para cada uma das classes de equipamento, descritas no item 1, serão apresentadas as considerações necessárias para implantação da metodologia proposta. Será definida (1) a opção do IPMVP selecionada, (2) os parâmetros energéticos e de produção, que sempre devem ser medidos, e (3) serão listadas possíveis variáveis independentes que também devem ser medidas, mas que variam de caso a caso.

4.1 CALDEIRAS

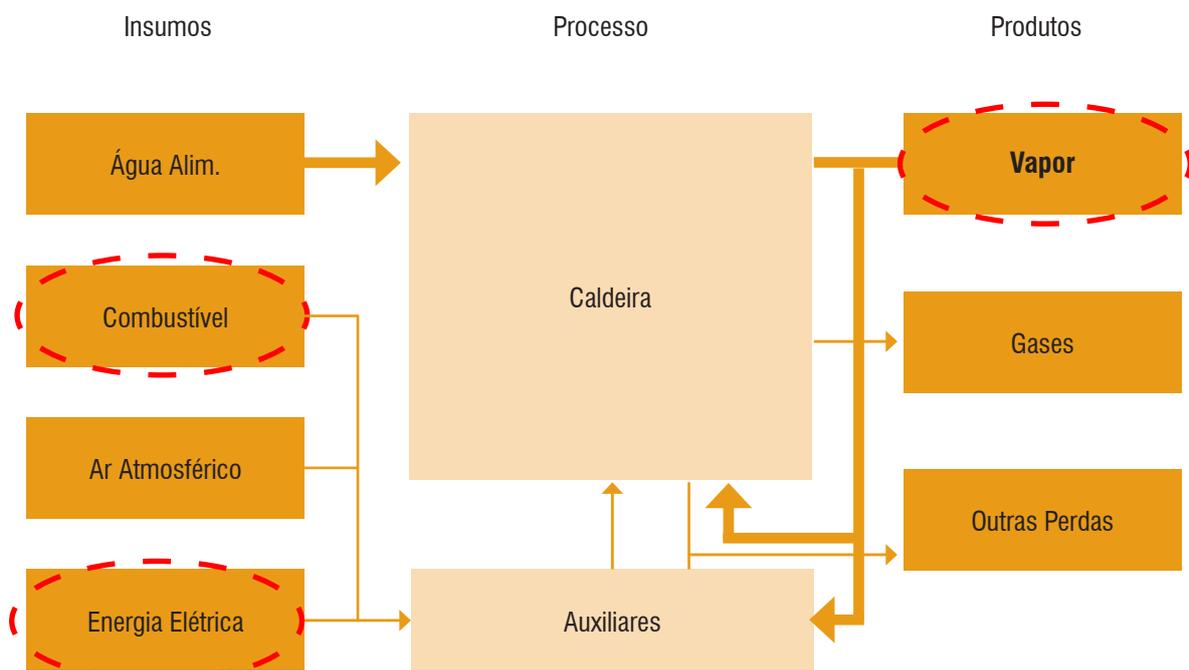
A caldeira é um equipamento cuja função é produzir vapor para ser utilizado em aquecimento, acionamento de máquinas, esterilização, cozimento, etc. Apesar de existirem diversos tipos de caldeiras, o método a ser utilizado pretende abranger todas elas.

4.1.1 OPÇÃO DO IPMVP E VOLUME DE CONTROLE

A análise da economia energética, obtida por meio da implantação de medidas de eficiência em Caldeiras, será determinada segundo as diretrizes da Opção B do IPMVP. Isso significa que o equipamento e seus auxiliares serão definidos como volume de controle e que todos os parâmetros com impacto significativo no consumo deverão ser monitorados.

O volume de controle a ser analisado é mostrado a seguir:

FIGURA 9 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA ESCOLHA DE VOLUME DE CONTROLE E VARIÁVEIS IMPORTANTES PARA A CALDEIRA



Fonte: Elaboração Própria

4.1.2 PARÂMETROS ENERGÉTICOS E DE PRODUÇÃO

Para as caldeiras, deverão ser registrados os seguintes parâmetros energéticos e de produção:

1. Produção de vapor. Deverá ser medido o vapor útil, que é definido como o vapor gerado na caldeira menos o vapor consumido por ela. Logo, deve ser descontado o vapor da sopragem, atomização e aquecimento do combustível. Vale ressaltar que dependendo da posição onde se encontram os medidores, estes consumos já podem ter sido deduzidos.
2. Consumos de combustíveis. Todos os combustíveis deverão ser medidos, desde os usuais como óleo, gás natural, carvão e biomassa até os gases combustíveis residuais, provenientes de outros processos que, em alguns casos, são incinerados nas caldeiras.

Em caldeiras de recuperação do processo de produção de ácido sulfúrico, deve-se medir o consumo de enxofre e, em caldeiras de recuperação química, do processo de produção de papel e celulose, deve-se medir o consumo de licor negro.

No caso das caldeiras elétricas, não existe consumo de combustíveis e, no caso das caldeiras de recuperação de gases quentes, o aporte térmico deverá ser calculado em função da vazão dos gases, sua composição e sua temperatura.

3. PCI dos combustíveis. O PCI deve ser monitorado, pois sua variação impacta diretamente no cálculo da economia. Para alguns combustíveis, como é o caso do gás natural, é usual que se utilize nos cálculos um valor de PCI constante. No entanto, conforme pode ser visto no gráfico abaixo, construído por meio do acompanhamento do PCI do gás em uma unidade fabril localizada na região sudeste, pode haver uma variação significativa que pode descaracterizar a economia real. No caso abaixo, a amplitude da variação ultrapassa 10%.

FIGURA 10 - VARIAÇÃO DO PCI DO GÁS NATURAL



Fonte: Elaboração Própria

Para alguns combustíveis, como, por exemplo, o bagaço-de-cana e o licor negro, normalmente são feitas as análises de poder calorífico superior do produto seco. Nos cálculos, ele deve ser corrigido para o poder calorífico inferior e também deve passar por uma correção de umidade.

No caso do licor negro, na câmara de combustão das caldeiras, ocorre uma redução do Na_2SO_4 para Na_2S . Essa redução consome parcela significativa da energia liberada na combustão e, portanto, deve ser considerada no cálculo do PCI.

4. Consumo elétrico. Em caldeiras elétricas, todo o aporte energético vem da eletricidade. Nas demais, apesar de secundário, deve-se incluir na análise o consumo elétrico dos auxiliares, tais como:

- Ventiladores ar de combustão
- Ventiladores de exaustão
- Bombas de alimentação de água
- Bombas de água desmineralizada
- Bombas de circulação forçada
- Sistema de ar comprimido
- Sistema de tratamento de gases
 - » Bombas de óleo
 - » Aquecimento elétrico de óleo combustível
 - » Transporte pneumático de combustíveis sólidos
 - » Correias para transporte de combustíveis sólidos
 - » Moagem de combustíveis sólidos
 - » Rachadores e picadores de toras (biomassa)

Como todos esses consumos serão agrupados para o cálculo do consumo elétrico total, não há necessidade de que cada um dos equipamentos seja medido separadamente.

As medições dos fluxos de vapor e combustíveis deverão seguir os padrões especificados pela ASME Performance Test Code - PTC4.

4.1.3 DEMAIS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Além dos parâmetros acima, que sempre deverão ser medidos e registrados, poderá ser necessário o registro de outras variáveis caso elas se alterem ao longo do tempo e caso essas alterações resultem em impacto significativo no consumo das caldeiras. Se isso ocorrer, será necessário fazer a divisão dos períodos de referência e pós-execução em grupos para realização da comparação em mesma base, conforme apresentado no item 3 do relatório.

Para a caldeira, os principais parâmetros são:

1. Pressão do vapor produzido
2. Temperatura do vapor produzido
3. Temperatura da água de alimentação da caldeira
4. Proporção do aporte térmico fornecido por cada um dos diferentes tipos de combustíveis. Aplicado em caldeiras que queimam mais de um combustível. Isso porque, mesmo que o aporte térmico da caldeira seja mantido constante, a alteração na proporção da contribuição de cada um dos combustíveis pode alterar o perfil de temperatura dos gases e, conseqüentemente, o rendimento do equipamento
5. Composição, umidade e PCI do combustível
6. Condições climáticas;

Nota com relação ao item 3: Uma medida de eficiência energética muito comum em caldeiras consiste na instalação de linhas de retorno de condensação de processo à caldeira, que resulta em uma elevação da temperatura de água de alimentação. Especificamente, neste caso, não se deve separar os períodos de referência e pós-execução em grupos em função desta temperatura para fazer a comparação em mesma base. Isso porque, neste caso, o que se quer quantificar é justamente o efeito dessa mudança de temperatura, que é o resultado da ação de eficiência.

4.1.4 EXEMPLO - INSTALAÇÃO DE ECONOMIZADOR EM CALDEIRA FLAMOTUBULAR

Uma caldeira flamotubular da empresa A, que fabrica suco de laranja concentrado, opera atualmente com cargas entre 5 e 10 t/h.

Esta caldeira possui as seguintes características:

- Caldeira Convencional
- Flamotubular
- Sem economizador
- Geração máxima de 10 t/h
- Combustível: gás natural

A medida de eficiência energética adotada foi a instalação de economizador, aproveitando-se do calor dos gases da chaminé para aquecer a água de alimentação. Esta medida foi realizada no final de dezembro de 2010.

Do acompanhamento da operação da caldeira, verificou-se que alguns parâmetros ficam constantes, como por exemplo, a temperatura da água de alimentação e o estado do vapor produzido. Constatou-se também que os demais parâmetros, como a temperatura ambiente, possuem pouquíssima influência no aporte total e, portanto, seus efeitos foram desprezados.

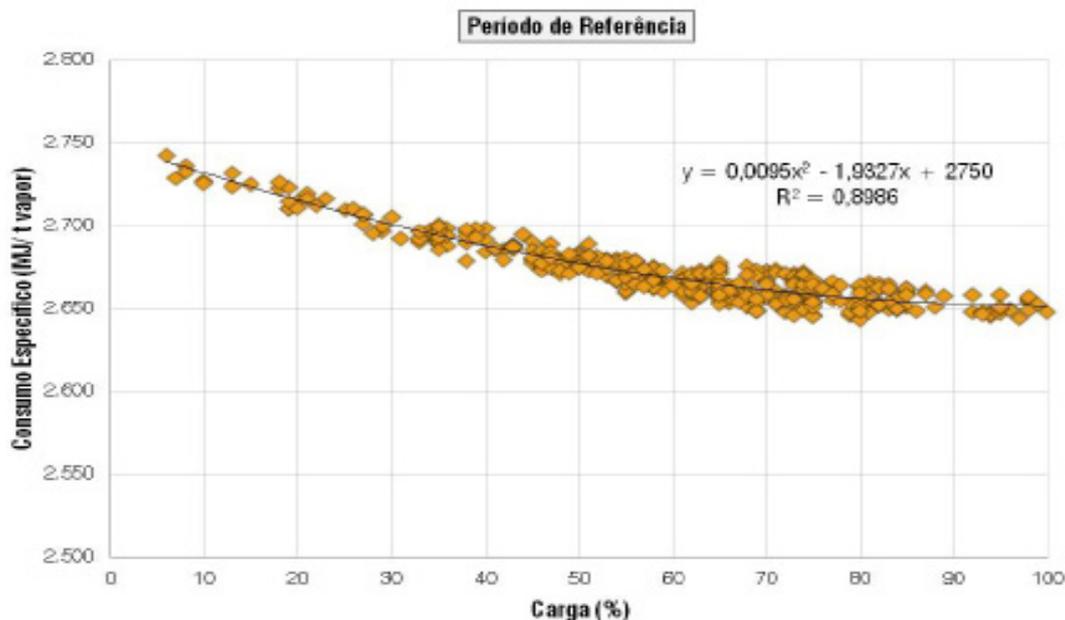
Com relação aos instrumentos de medição, os seguintes dados foram levantados:

- Precisão do Instrumento de medição de consumo do gás natural 1%
- Precisão do Instrumento de medição de vazão do vapor 1%

Antes da implantação da medida de eficiência, foram obtidos os dados históricos da produção e do consumo da caldeira por meio do sistema supervisor da unidade para o período de um ano, com dados médios horários. Foi utilizado este período, pois, neste caso, ele abrange todos os modos e ciclo de funcionamento, dado que a produção de suco de laranja é sazonal.

Por meio dos levantamentos de consumos de gás natural, PCI e produção de vapor, calcularam-se os consumos específicos, definindo-se os pontos de operação do período de referência, indicados no gráfico abaixo. Em seguida, gerou-se uma curva por meio de uma regressão para um polinômio de segundo grau, e obteve-se a equação de consumo específico em função da produção de vapor que representa o período de referência.

FIGURA 11 - PONTOS DE OPERAÇÃO DO PERÍODO DE REFERÊNCIA E RESPECTIVA REGRESSÃO



Fonte: Elaboração Própria

Verificou-se que o R^2 é superior a 0,75, o que mostra que o modelo de segundo grau utilizado está aderente aos pontos reais. Também, calculou-se o erro padrão deste modelo obtendo-se o valor de 6,04 MJ/t vapor, que será utilizado no cálculo da incerteza da economia.

Depois de implantada a medida de eficiência energética, foram levantados os dados de operação do período de pós-execução de um ano, que representa um ciclo completo de operação.

Assim, dados a equação de operação do período de referência e os valores obtidos de consumos e produções horários da caldeira após a instalação do economizador, é calculada a economia da caldeira conforme o procedimento abaixo:

1. Calcula-se o consumo teórico da caldeira caso não houvesse a medida de eficiência energética, da seguinte forma:
 - Substituem-se as produções do período de pós-execução na equação de consumo específico em função da produção de vapor, que representa o período de referência. Serão obtidos com isso os consumos específicos teóricos.

- Multiplicam-se os consumos específicos teóricos pelas respectivas produções do período de pós-execução, obtendo-se os consumos teóricos.
2. Calcula-se a economia energética para cada hora pela diferença entre o consumo teórico e o real. A partir destes dados, calcula-se a diminuição do consumo de combustível.
 3. Utilizando um fator de emissão de CO₂ para o gás natural (retirado das tabelas do IPCC; adotou-se o menor valor, 1,94 kg CO₂/ m³), calcula-se a redução da emissão deste gás.

Para ilustrar o procedimento, a tabela a seguir mostra os resultados dos cálculos das economias diárias obtidas para as primeiras 24 horas do mês de janeiro. Este procedimento deve ser realizado para todo o período a ser analisado, que é para o ano de 2011.

TABELA 4 - CÁLCULO DA ECONOMIA HORÁRIA PARA O EXEMPLO DA CALDEIRA

CÁLCULO DE ECONOMIA	PRODUÇÃO	CONSUMO "REAL"	CONSUMO TEORICO	ECONOMIA		
	T	MJ	MJ	MJ	M ³	TCO2
01/01/12 00:00	7,9	20.291	20.987	696	19,8	0,039
01/01/12 01:00	8,0	20.563	21.249	687	19,6	0,038
01/01/12 02:00	8,2	20.948	21.774	827	23,6	0,046
01/01/12 03:00	8,0	20.453	21.249	797	22,7	0,044
01/01/12 04:00	7,5	19.312	19.939	627	17,9	0,035
01/01/12 05:00	8,0	20.500	21.249	749	21,4	0,041
01/01/12 06:00	7,8	20.044	20.725	681	19,4	0,038
01/01/12 07:00	7,7	19.833	20.463	630	17,9	0,035
01/01/12 08:00	7,6	19.506	20.201	695	19,8	0,038
01/01/12 09:00	8,5	21.662	22.562	900	25,6	0,050
01/01/12 10:00	7,7	19.790	20.463	673	19,2	0,037
01/01/12 11:00	8,5	21.739	22.562	823	23,4	0,045
01/01/12 12:00	7,5	19.198	19.939	740	21,1	0,041
01/01/12 13:00	8,4	21.460	22.299	840	23,9	0,046
01/01/12 14:00	7,5	19.180	19.939	758	21,6	0,042
01/01/12 15:00	8,5	21.863	22.562	699	19,9	0,039
01/01/12 16:00	7,5	19.282	19.939	656	18,7	0,036
01/01/12 17:00	7,9	20.227	20.987	760	21,7	0,042
01/01/12 18:00	7,7	19.684	20.463	779	22,2	0,043
01/01/12 19:00	7,9	20.198	20.987	789	22,5	0,044
01/01/12 20:00	7,9	20.224	20.987	763	21,8	0,042
01/01/12 21:00	8,3	21.155	22.037	882	25,1	0,049
01/01/12 22:00	7,5	19.157	19.939	781	22,3	0,043
01/01/12 23:00	7,5	19.328	19.939	611	17,4	0,034

Fonte: Elaboração Própria

Para estas primeiras 24 horas, os resultados foram os seguintes:

- Produção Total: 190 toneladas
- Consumo Térmico Real Total: 485.597 MJ
- Consumo Térmico Teórico Total: 503.440 MJ
- Economia Total: 17.842 MJ (509 m³ 0,987 t CO₂)

A tabela a seguir mostra os resultados dos cálculos do Erro Padrão (EP) para cada intervalo, onde:

- EP Produção e EP Consumo Real foram calculados pela equação B-13 do IPMVP:

$$EP = \frac{\text{precisão relativa do medidor} \cdot \text{valor medido}}{t (= 1,96)}$$

- EP Consumo Teórico foi calculado por:

$$EP_{teórico_i} = \text{Consumo Teórico}_i \cdot \sqrt{\frac{EP_{CE}^2}{CE_i} + \frac{EP_{produção}^2}{produção_i}}$$

Onde EP CE é erro padrão da estimativa do modelo da regressão, calculado a partir dos dados do período de referência, que neste caso, conforme foi mostrado acima, corresponde a 6,04 MJ/t vapor.

- EP Economia foi calculado por:

$$EP_{econ_i} = \sqrt{EP_{teórico}^2 + EP_{real}^2}$$

TABELA 5 - CÁLCULOS DOS ERROS PADRÕES

CÁLCULO DE ECONOMIA	EP PRODUÇÃO	EP CONSUMO "REAL"	EP CONSUMO TEÓRICO	EP ECONOMIA
	T	MJ	MJ	MJ
01/01/11 00:00	0,04	104	117	156
01/01/11 01:00	0,04	105	119	158
01/01/11 02:00	0,04	107	122	162
01/01/11 03:00	0,04	104	119	158
01/01/11 04:00	0,04	99	111	149
01/01/11 05:00	0,04	105	119	158
01/01/11 06:00	0,04	102	116	154
01/01/11 07:00	0,04	101	114	153
01/01/11 08:00	0,04	100	113	150
01/01/11 09:00	0,04	111	126	168
01/01/11 10:00	0,04	101	114	153
01/01/11 11:00	0,04	111	126	168
01/01/11 12:00	0,04	98	111	148
01/01/11 13:00	0,04	109	125	166
01/01/11 14:00	0,04	98	111	148
01/01/11 15:00	0,04	112	126	168
01/01/11 16:00	0,04	98	111	149
01/01/11 17:00	0,04	103	117	156
01/01/11 18:00	0,04	100	114	152
01/01/11 19:00	0,04	103	117	156
01/01/11 20:00	0,04	103	117	156
01/01/11 21:00	0,04	108	123	164
01/01/11 22:00	0,04	98	111	148
01/01/11 23:00	0,04	99	111	149

Fonte: Elaboração Própria

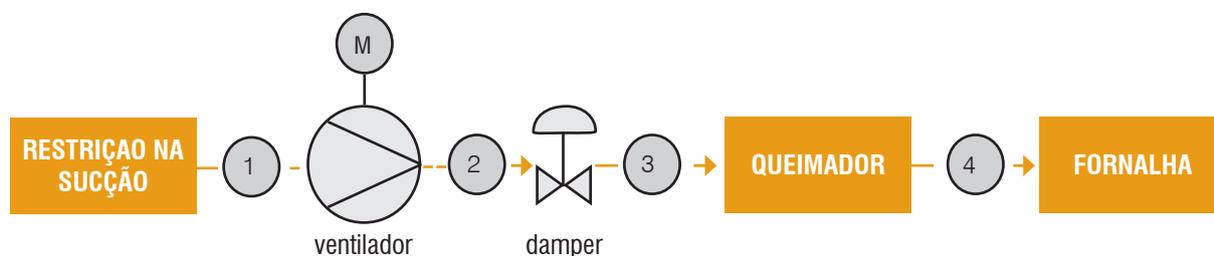
O erro padrão da economia total, para estas primeiras 24 horas, é calculado pela raiz das soma dos quadrados de cada erro padrão, e obtém-se o valor de 766 MJ.

A precisão absoluta é calculada a partir do erro padrão multiplicada pelo valor "t", obtido do Quadro B-1 do IPMVP para um intervalo de confiança de 95%, que neste caso é de 2,07 (24 pontos). Ou seja, a economia ao final dessas 24 horas foi de $(17.842 \pm 2,07 * 766)$ MJ.

Este cálculo foi aplicado para os demais dias de 2011. A economia térmica totalizada ao final deste período foi de $3.963.303 \pm 29.270$ MJ, o que representou 3,7% do consumo evitado se não houvesse a instalação do economizador, significando uma redução de consumo de 112.959 m³ de gás natural,

equivalente a uma emissão de 219,1 t CO₂.

De maneira similar, os efeitos sobre o sistema auxiliar foram verificados por meio de medições elétricas. Para esta caldeira, havia medição dedicada para o cubículo de seus auxiliares (bomba e ventilador de admissão). O impacto nos auxiliares com a instalação do economizador implicou apenas em redução de ar de combustão. A perda de carga extrarresultante da instalação do economizador foi neutralizada pela maior abertura do damper do ventilador.



A economia do consumo de energia elétrica totalizada ao final deste período foi de 38.275 ± 273 MJ, o que equivale a uma emissão evitada de 3,29 t CO₂, uma vez que o fator de emissão da margem combinada para o ano de 2010 foi de 0,3095 tCO₂/MWh.

O erro padrão do consumo teórico (ver item 3.4.1.3) é de 10.975 MJ, dado por:

$$EP_{\text{consumo teórico total}} = \sqrt{EP_{\text{consumo teórico térmico}}^2 + EP_{\text{consumo estimado elétrico}}^2}$$

- EP (consumo teórico térmico) = 10.972 MJ, e é o erro padrão do consumo teórico térmico;
- EP (consumo teórico elétrico) = 273 MJ, e é o erro padrão do consumo teórico elétrico.

Como ele é menor que metade da economia total (térmico + elétrico), o cálculo é válido.

4.2 FORNOS

Os fornos discutidos neste relatório são aqueles dotados de sistema de combustão, com o objetivo de causar um transiente de temperatura no produto de forma a alterar suas características físicas e, em alguns casos, químicas.

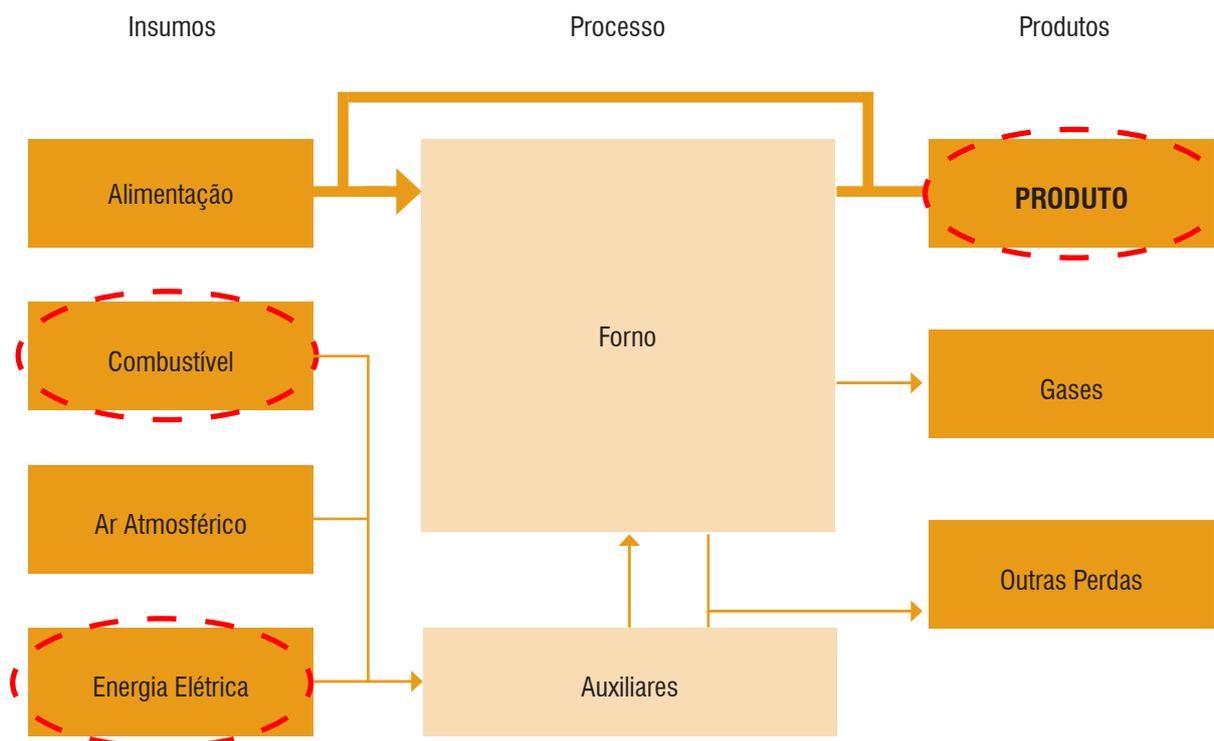
A metodologia de cálculo de economia de fornos é a mesma que a aplicada às caldeiras. Entretanto, deve-se tomar um cuidado maior com a variação do processo. Isso porque, ele envolve mais variáveis independentes que a caldeira, onde cujas propriedades físico-químicas do vapor são muito mais conhecidas e de fácil medição se comparadas com processos dos fornos.

4.2.1 OPÇÃO DO IPMVP E VOLUME DE CONTROLE

A análise da economia energética, obtida por meio da implantação de medidas de eficiência em fornos, será determinada segundo as diretrizes da Opção B do IPMVP. Isso significa que o equipamento e seus auxiliares serão definidos como volume de controle e que todos os parâmetros com impacto significativo no consumo deverão ser monitorados.

O volume de controle a ser analisado é mostrado a seguir:

FIGURA 12 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE VOLUME DE CONTROLE E VARIÁVEIS IMPORTANTES PARA O FORNO



Fonte: Elaboração Própria

4.2.2 PARÂMETROS ENERGÉTICOS E DE PRODUÇÃO

Nos fornos, deverão ser registrados os seguintes parâmetros energéticos e de produção:

1. Produção
2. Consumos de combustíveis: todos os combustíveis deverão ser medidos, desde os usuais como óleo, gás natural, carvão e biomassa até os gases combustíveis residuais, provenientes de outros processos que, em alguns casos, são incinerados em fornos.
3. PCI dos combustíveis
4. Consumo elétrico: deve-se incluir na análise o consumo elétrico dos auxiliares, tais como:
 - Ventiladores ar de combustão
 - Ventiladores de exaustão;
 - Ventiladores de recirculação/processo;
 - Sistema de ar comprimido;
 - Sistema de tratamento de gases;
 - Sistema de alimentação de matéria prima;
 - Sistema de transporte de produtos e resíduos;
 - Consumo associado ao transporte, armazenamento e tratamento de combustível:
 - » Bombas de óleo;
 - » Aquecimento elétrico de óleo combustível;
 - » Transporte pneumático de combustíveis sólidos;
 - » Correias para transporte de combustíveis sólidos;

- » Moagem de combustíveis sólidos;
- » Rachadores e picadores de toras (biomassa);

Como todos esses consumos serão agrupados para o cálculo do consumo elétrico total, não há necessidade de que cada um dos equipamentos seja medido separadamente.

4.2.3 DEMAIS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Possíveis fatores que podem influenciar no consumo dos fornos são:

1. Temperatura de alimentação da matéria-prima: esse fator tem grande impacto no consumo de energia e merece grande atenção. Podemos citar aqui como exemplo o caso dos fornos de reaquecimento de tarugos destinados à laminação, na indústria siderúrgica. Ele pode receber tarugos quentes provenientes do lingotamento ou tarugos frios provenientes da estocagem, ou ainda, um pouco de cada. Obviamente, o forno apresentará um consumo muito maior quando receber barras à temperatura ambiente do que quando receber barras a aproximadamente 700°C, o que gera a necessidade de separar os pontos de operação em grupos para que se faça a análise sempre em mesma base.
2. Umidade de entrada da matéria-prima
3. Composição da matéria-prima
4. Variação de produtos, que envolve:
 - Composição do produto:
 - Dimensões/superfície específica do produto
 - Perfil de temperatura do produto no forno
 - Tempo de residência do produto no forno

Um forno pode tratar mais de um tipo de produto, como por exemplo, os fornos de tratamento térmico de tubos, onde cada tipo de tubo necessita de um perfil de temperatura e de um tempo de tratamento. Para estes casos, é preciso traçar diversas curvas, uma para cada tipo de material. Se possível, devem-se criar grupos de produtos com características e consumos específicos semelhantes.

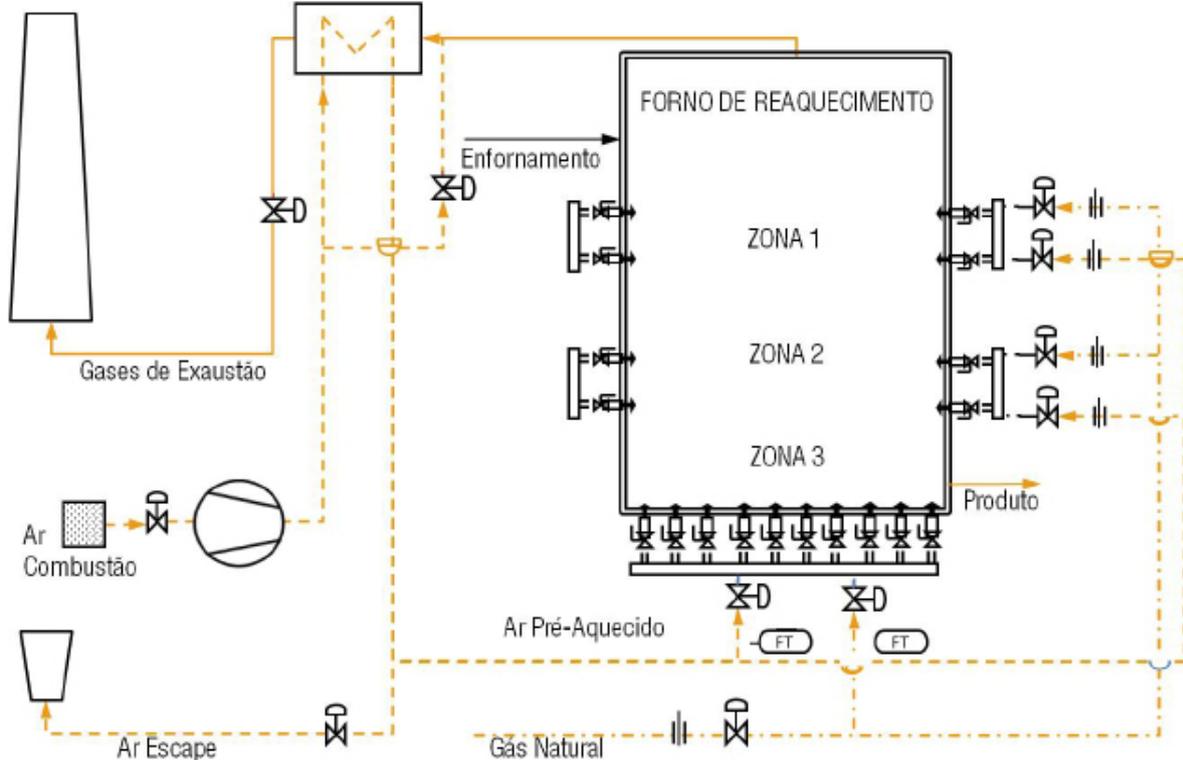
5. Proporção diferente dos combustíveis utilizados, caso utilizado mais de um
6. Composição, umidade e PCI dos combustíveis
7. Condições climáticas.

4.2.4 EXEMPLO - INSTALAÇÃO DE RECUPERADOR MAIS EFICIENTE EM FORNO

O exemplo abaixo é de um forno de reaquecimento de tarugos em indústria siderúrgica.

Este forno tem produção de 40 t/h, sendo que podem ser alimentados tarugos quentes (700°C) ou frios (25°C), queima gás natural e possui um recuperador com diversos vazamentos. A medida de eficiência energética foi a instalação de um recuperador mais eficiente, realizada em final de dezembro de 2009.

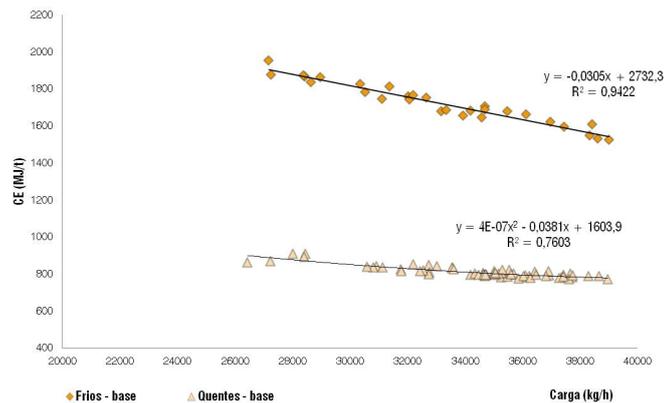
FIGURA 13 - ESQUEMA DO FORNO DE REAQUECIMENTO COM RECUPERADOR



Fonte: Elaboração Própria

Durante o planejamento da M&V, verificou-se que ocorre alimentação somente de barras quentes ou frias, ou seja, as barras nunca são intercaladas entre si. Desta maneira, apenas duas curvas foram necessárias para o período de referência, uma representando as barras quentes e outra as frias, como pode ser observado na figura a seguir:

FIGURA 14 - PONTOS DE OPERAÇÃO PARA AS DUAS OPERAÇÕES NO FORNO E SUAS RESPECTIVAS REGRESSÕES



Fonte: Elaboração Própria

O procedimento de cálculo para o forno é o mesmo utilizado no exemplo da caldeira, porém, com a divisão dos períodos em dois grupos. O intervalo de transição entre barras quentes e frias foi desconsiderado por ser muito curto em comparação aos demais.

O período de referência utilizado foi de um mês, para se obterem diversos pontos de operação do forno, com alimentação de tarugos quentes e frios. A quantidade de pontos obtidos foi suficiente de maneira a caracterizar a curva de operação do forno e reduzir o erro padrão do modelo de regressão.

A tabela a seguir mostra em maiores detalhes os resultados do cálculo de economia para o período de um dia.

TABELA 6 - CÁLCULO DA ECONOMIA HORÁRIA PARA O EXEMPLO DO FORNO

Cálculo de Economia	Condição de Operação	Produção	Consumo Real	Consumo Teórico	Economia		
		kg	MJ	MJ	MJ	m ³	IC02
01/01/12 00:00	Barra Quente	35.571	25.757	26.848	1.091	31,1	0,0603
01/01/12 01:00	Barra Quente	35.263	25.648	26.721	1.073	30,6	0,0593
01/01/12 02:00	Barra Quente	35.072	25.521	26.643	1.123	32,0	0,0621
01/01/12 03:00	Transição	36.060	44.448	27.050	0	0,0	0,0000
01/01/12 04:00	Barra Fria	34.646	55.333	58.053	2.720	77,5	0,1504
01/01/12 05:00	Barra Fria	35.474	56.001	58.544	2.543	72,5	0,1406
01/01/12 06:00	Barra Fria	35.298	54.505	58.443	3.938	112,2	0,2178
01/01/12 07:00	Barra Fria	34.195	54.078	57.767	3.690	105,2	0,2040
01/01/12 08:00	Barra Fria	36.248	56.534	58.966	2.432	69,3	0,1345
01/01/12 09:00	Barra Fria	34.715	54.138	58.095	3.958	112,8	0,2188
01/01/12 10:00	Transição	35.596	39.015	26.858	0	0,0	0,0000
01/01/12 11:00	Barra Quente	35.190	25.589	26.691	1.103	31,4	0,0610
01/01/12 12:00	Barra Quente	35.034	25.499	26.628	1.128	32,2	0,0624
01/01/12 13:00	Barra Quente	34.659	25.309	26.476	1.167	33,2	0,0645
01/01/12 14:00	Barra Quente	35.545	26.055	26.837	782	22,3	0,0432
01/01/12 15:00	Barra Quente	34.352	25.012	26.352	1.340	38,2	0,0741
01/01/12 16:00	Barra Quente	35.701	25.859	26.901	1.042	29,7	0,0576
01/01/12 17:00	Barra Quente	28.430	22.830	23.996	1.165	33,2	0,0644
01/01/12 18:00	Barra Quente	27.190	22.473	23.483	1.010	28,8	0,0559
01/01/12 19:00	Barra Quente	28.656	22.649	24.087	1.439	41,0	0,0796
01/01/12 20:00	Barra Quente	36.109	26.130	27.071	941	26,8	0,0520
01/01/12 21:00	Barra Quente	34.698	25.203	26.491	1.288	36,7	0,0712
01/01/12 22:00	Barra Quente	35.604	25.774	26.861	1.088	31,0	0,0601
01/01/12 23:00	Barra Quente	35.023	25.681	26.623	943	26,9	0,0521
02/01/12 00:00	Barra Quente	34.493	25.059	26.409	1.350	38,5	0,0746
TOTAL DO DIA		858.822	840.099	848.896	38.352	1.093	2,1

fonte: Elaboração Própria

A economia para o primeiro dia representa 38.352 MJ (4,52%) do total de energia que seria gasto caso não houvesse a medida de eficiência, uma redução de consumo de gás natural de 1.093 m³ e de 2,1 t CO₂ de emissão.

Para facilitar a visualização, os resultados anteriores são apresentados no seguinte gráfico:

FIGURA 15 - GRÁFICO DA ECONOMIA HORÁRIA OBTIDA PARA O EXEMPLO DO FORNO



Fonte: Elaboração Própria

De maneira similar, os efeitos sobre o sistema auxiliar foram verificados por meio de medições elétricas. Para este caso, o impacto nos auxiliares com as melhorias no recuperador implicou apenas em redução de ar no ventilador de ar de combustão.

A economia do consumo de energia elétrica totalizada ao final das primeiras 24 horas foi de 503 MJ.

Os cálculos foram aplicados para os demais dias de 2011. A economia térmica totalizada ao final deste período foi de $14.157.770 \pm 21.107$ MJ, o que representou 4,92% do consumo teórico caso não houvesse as melhorias do recuperador. Isso corresponde a uma redução de consumo de 403.523 m^3 de gás natural, equivalente a uma emissão de 783 t CO_2 , utilizando um fator próprio de emissão, obtido de análises realizadas em laboratório especializado. A economia elétrica representou 165.990 ± 1.450 MJ, o que equivale a uma emissão evitada de $14,27 \text{ t CO}_2$, uma vez que o fator de emissão da margem combinada para o ano de 2010 foi de $0,3095 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$.

4.3 SECADORES

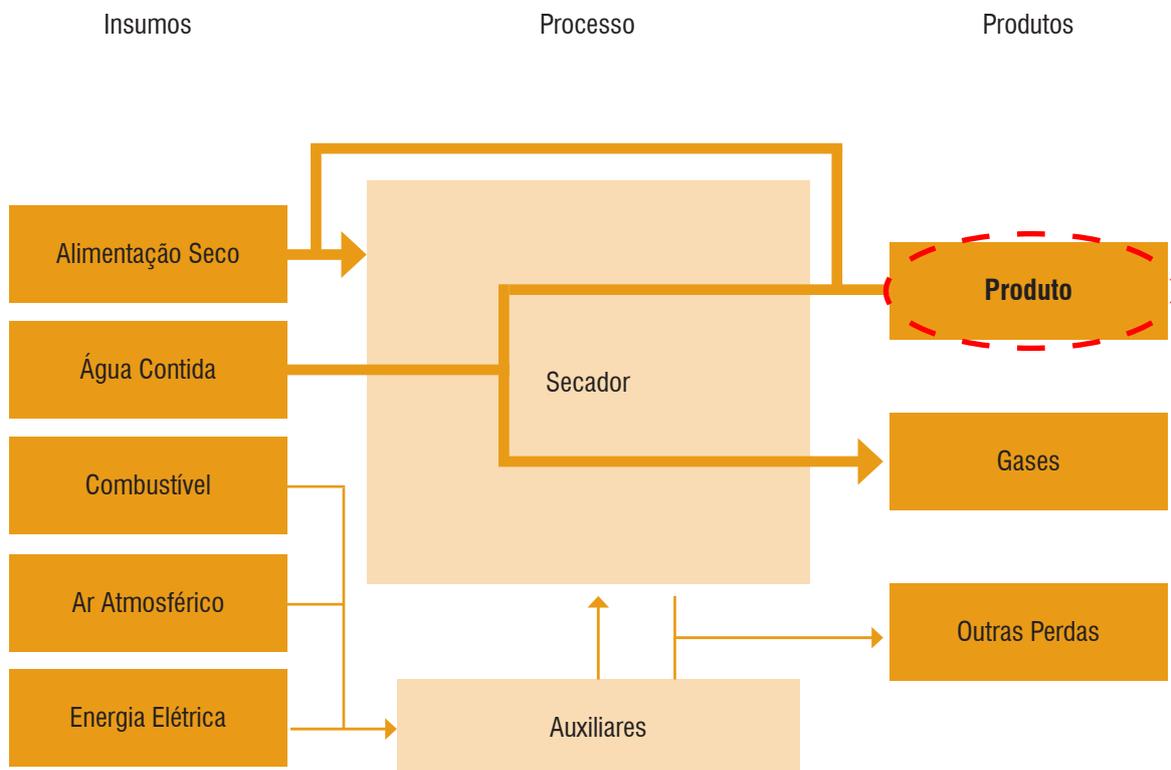
Secadores são equipamentos que têm a função de retirar água ou algum outro tipo de fluido contido em um determinado produto.

4.3.1 OPÇÃO DO IPMVP E VOLUME DE CONTROLE

Assim como para as caldeiras e fornos, a análise da economia energética, obtida por meio da implantação de medidas de eficiência em secadores, será determinada segundo as diretrizes da Opção B do IPMVP. Isso significa que o equipamento e seus auxiliares serão definidos como volume de controle e que todos os parâmetros com impacto significativo no consumo deverão ser monitorados.

O volume de controle a ser analisado é mostrado abaixo:

FIGURA 16 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE VOLUME DE CONTROLE E VARIÁVEIS IMPORTANTES NA SECAGEM



Fonte: Elaboração Própria

4.3.2 PARÂMETROS ENERGÉTICOS E DE PRODUÇÃO

Para a secagem os parâmetros energéticos e de produção, que deverão ser registrados, serão:

1. Produção: quando houver recirculação de produto na secagem, a produção do secador deve ser medida após o ponto de recirculação. Por exemplo: na granulação de fertilizante, após o secador, existe uma classificação que separa o material fora de especificação e o envia novamente ao granulador. Este material é misturado com água, granulado, para então ser secado novamente. A medição de produção deve ser a do fluxo na saída da classificação (chamado de “output”) e não o da saída do secador (chamado de “throughput”).
2. Consumos de combustíveis
3. PCI dos combustíveis
4. Consumo elétrico: deve-se incluir na análise, o consumo elétrico dos auxiliares, tais como:
 - Ventiladores ar de combustão
 - Ventiladores de exaustão
 - Ventiladores de recirculação
 - Sistema de ar comprimido
 - Sistema de tratamento de gases
 - Sistema de alimentação de produto úmido
 - Sistema de transporte de produtos seco
 - Consumo associado ao transporte, armazenamento e tratamento de combustível:
 - » Bombas de óleo;
 - » Aquecimento elétrico de óleo combustível;
 - » Transporte pneumático de combustíveis sólidos;
 - » Correias para transporte de combustíveis sólidos;
 - » Moagem de combustíveis sólidos;
 - » Rachadores e picadores de toras (biomassa);

Como todos esses consumos serão agrupados para o cálculo do consumo elétrico total, não há necessidade de que cada um dos equipamentos seja medido separadamente.

4.3.3 DEMAIS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

As demais variáveis que podem influenciar no consumo dos secadores são:

1. Umidade de entrada da matéria-prima: nos secadores, é necessário ter uma atenção especial à umidade de entrada do produto, que tem grande impacto na carga térmica. Principalmente quando não houver um controle de processo desta variável. Por exemplo: nas secagens de minério, a umidade depende das condições ambientais já que a matéria-prima fica exposta ao tempo nas minas, pátios de estocagem e durante o transporte. Nesses casos, deve haver um monitoramento da umidade e as comparações deverão ser sempre feitas em mesma base, ou seja, deverão ser criadas equações para as diversas faixas de umidade existentes.
2. Umidade de saída do produto
3. Temperatura de alimentação da matéria-prima

4. Composição da matéria-prima
5. Variação de produtos, que envolve:
 - Composição do produto
 - Dimensões/superfície específica do produto
6. Proporção diferente dos combustíveis utilizados, caso utilizado mais de um
7. Composição, umidade e PCI dos combustíveis
8. Condições climáticas.

4.4 ELETRÓLISE

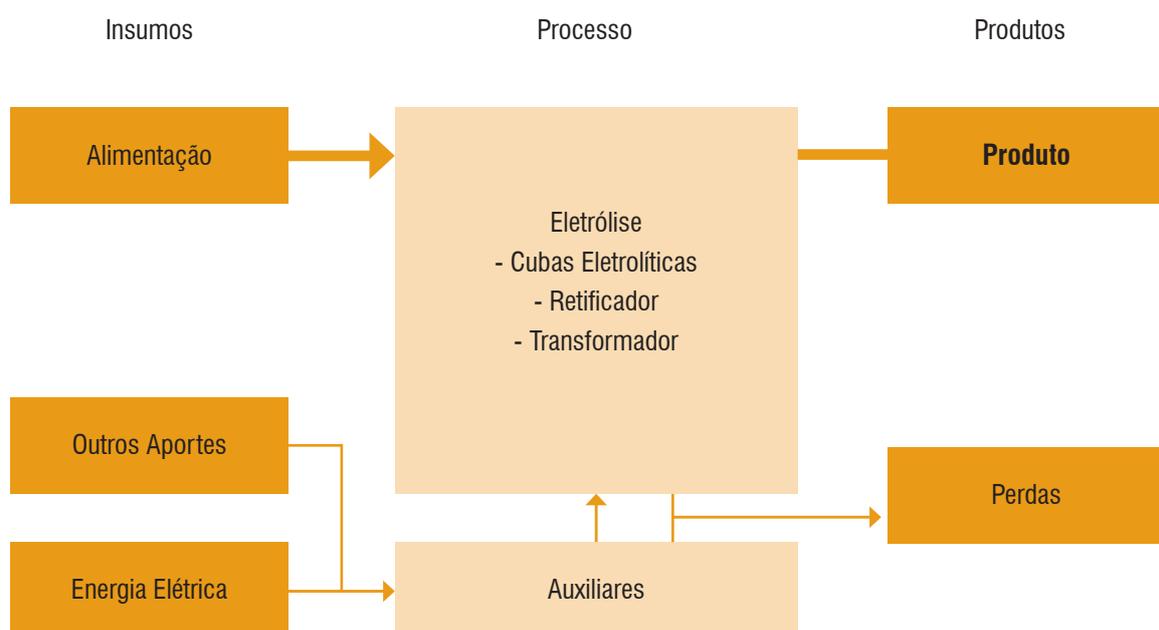
No processo da eletrólise ocorre a separação de elementos químicos de um composto por meio de um intenso uso da energia elétrica. Em alguns tipos de eletrólise, como na do alumínio, há consumo de carbono e geração de CO₂, CO e outros compostos. Apesar do carbono geralmente ser encarado como um insumo, ele será tratado aqui como um combustível. Será necessário, portanto, o acompanhamento desse consumo.

4.4.1 OPÇÃO DO IPMVP E VOLUME DE CONTROLE

A análise da economia energética, obtida por meio da implantação de medidas de eficiência na eletrólise, será determinada segundo as diretrizes da Opção B do IPMVP. Isso significa que o equipamento e seus auxiliares serão definidos como volume de controle e que todos os parâmetros com impacto significativo no consumo deverão ser monitorados.

Para o processo de eletrólise, serão considerados dentro do volume de controle as cubas eletrolíticas, os retificadores e transformadores. Estes dois últimos normalmente são dedicados ao fornecimento de energia elétrica às cubas e, por isso, estão sendo considerados neste volume de controle. Neles também estão associadas algumas perdas elétricas, que também podem ser encontradas nos barramentos de interligação das células eletrolíticas e nos contatos entre as barras equipotenciais e os eletrodos (catodo e ânodo).

FIGURA 17 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE VOLUME DE CONTROLE E VARIÁVEIS IMPORTANTES NA ELETRÓLISE



Fonte: Elaboração Própria

4.4.2 PARÂMETROS ENERGÉTICOS E DE PRODUÇÃO

Os seguintes parâmetros deverão ser medidos e registrados:

1. Produção
2. Consumos de combustíveis: na indústria do alumínio, deverão ser medidos e registrados os consumos de anodo, uma vez que eles resultam em emissões de gases de efeito estufa. Para o processo “Soderberg” deve-se medir o consumo de pasta e para o processo “Prebake” deve-se medir o consumo de anodos pré-cozidos.
3. PCI do anodo
4. Consumo elétrico: a medição de energia elétrica deve ser realizada na entrada do transformador, de modo a incluí-lo no volume de controle. Com isso, medidas de eficiência energética realizadas no equipamento serão também contabilizadas.

Deve-se incluir na análise o consumo elétrico dos auxiliares, tais como:

- Sistema de exaustão e tratamento de gases
- Sistema de bombeamento de solução eletrolítica e solução exaurida;
- Torres de resfriamento.

4.4.3 DEMAIS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

As demais variáveis que podem influenciar no consumo das eletrólises são:

1. Densidade de corrente: a densidade de corrente com a qual as células eletrolíticas estão operando possui forte influência no consumo específico de energia elétrica da eletrólise. Por exemplo, a tabela abaixo apresenta uma referência de consumo específico em função da densidade de corrente utilizada, para a eletrólise de zinco:

TABELA 7 - INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DE CORRENTE NO CONSUMO ESPECÍFICO

DENS. DE CORRENTE (A/M2)	CONSUMO ESPECÍFICO (KWH / T)
300	2690
400	2760
500	2850
600	2950

Fonte: An Optimal Power-Dispatching Control System for the Electrochemical Process of Zinc Based on Backpropagation and Hopfield Neural Networks” por Chunhua Yang, Geert Deconinck and Weihua Gui.

Verifica-se na tabela acima que o consumo específico na eletrólise de zinco aumenta muito com a densidade de corrente. Desse modo, as comparações deverão ser realizadas em mesma base, ou seja, os períodos de referência e pós-execução deverão ser separados em grupos de pontos de operação de acordo com a faixa de densidade de corrente e a comparação sempre deverá ser feita entre os grupos correspondente, que possuem pontos dentro da mesma faixa (ver item 3 do relatório). Apenas nos casos específicos onde a própria ação de eficiência energética está associada a uma mudança na densidade de corrente, não se deve fazer a comparação em mesma base, já que o objetivo é justamente verificar o impacto dessa mudança. O mesmo vale para as demais variáveis independentes listadas a baixo.

2. Temperatura da solução

3. Concentrações da solução eletrolítica

4.5 BOMBAS

Bombas são máquinas que realizam trabalho sobre um líquido por meio da energia mecânica proveniente de uma força motriz, cuja finalidade é realizar o deslocamento do líquido por escoamento. As bombas podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- Bombas de deslocamento positivo ou volumétricas: engrenagem, lóbulos, parafusos, pistão, diafragma
- Bombas dinâmicas ou turbobombas: centrífuga, de fluxo misto, axial.

4.5.1 OPÇÃO DO IPMVP

Nos casos onde a bomba, alvo da ação de eficiência energética, operar de forma constante e não existirem medições e registros de seus parâmetros de processo, poderão ser feitas medições instantâneas do consumo elétrico nos períodos de referência e pós-execução para o cálculo da economia. Neste caso, para a totalização da economia, será ainda necessário estimar o tempo de operação anual da bomba com base em outros equipamentos do mesmo processo, que possuam registros de parâmetros de operação. Uma vez que será feita tal estimativa, a análise se enquadra na Opção A do IPMVP.

Nos demais casos, quando a bomba não opera de forma constante, todos os parâmetros de processo com impacto no consumo energético deverão ser monitorados, conforme as diretrizes da Opção B do IPMVP.

As medições devem atender às normas especificadas na ASME PTC 8.2-1990, Centrifugal Pumps. PTC 8.2

4.5.2 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA BOMBAS

No caso das bombas, esta metodologia propõe três métodos para o cálculo da energia evitada. Os métodos propostos são utilizados de acordo com as condições de operação do sistema de bombeamento e das medições disponíveis, a saber:

- Método 1 – Ponto Único de Operação:
 - » Vazão e rotação constantes.
- Método 2 – Períodos de Referência e Pós-execução definidos via Curva Característica:
 - » Vazão variável e rotação constante (controle via válvula)
 - » Registro de vazão existente e registro de potência elétrica inexistente.
- Método 3 – Levantamento Completo:
 - » Vazão e rotação variáveis (controle via inversor de frequência)
 - » Exige registro de vazão e de potência elétrica.

Método 1: Ponto Único de Operação

Quando a bomba trabalhar em regime constante, sem variações de vazão e de rotação, será necessário apenas fazer uma comparação direta do consumo elétrico do período de referência e do período pós-execução. Para isso, deverão ser medidas as potências elétricas em cada um dos períodos.

Para calcular a economia total anual, será necessário saber qual é o regime de operação da bomba,

ou seja, quantas horas por ano ela opera. Este valor poderá ser estimado com base no regime de operação de outro equipamento do mesmo processo, que opera junto com a bomba em questão, e que possui registros de parâmetros de processo que possibilitem distinguir os momentos de operação e parada (consumo elétrico, consumos de combustíveis, produção, etc).

Além da medição de consumo elétrico da bomba, recomenda-se que seja medida a vazão nos dois períodos como forma de se certificar que não houve mudanças nas condições operacionais. Quando houver possibilidade de variações, deve-se também verificar a densidade do fluido nos dois períodos (no caso de lama, por exemplo). Para este método, também é necessário que se faça a quantidade de leituras/medições suficiente para que o critério de validação da economia seja atendido, o erro deve ser menor que a metade da economia.

Exemplo: Uma unidade possuía três fornos elétricos, que operavam em paralelo. Em 2005, um dos fornos foi desativado. O sistema de resfriamento das paredes dos fornos e de trechos da tubulação de gases quentes era comum aos três equipamentos e, com a desativação de um deles, ele ficou superdimensionado. O sistema é dotado de uma bomba de água principal e uma reserva e o ajuste de vazão é realizado por meio de válvulas manuais. Como a bomba ficou superdimensionada para a operação com dois fornos, as válvulas trabalhavam bastante fechadas. Decidiu-se, então, substituir os rotores das bombas para outros menores, reduzindo-se a pressão de fornecimento da água e o consumo elétrico. Com isso, o sistema passaria a trabalhar com válvulas mais abertas de modo que a vazão não seria modificada.

Para possibilitar a verificação da economia, durante o período de referência, mediram-se a potência da bomba e a vazão de água para cada forno. Depois de implantada a alternativa, foram ajustadas as vazões de água de resfriamento para os dois fornos aos mesmos valores do período anterior à troca de rotores. Após ajustadas as válvulas manuais e confirmada a vazão por meio de medições, mediu-se a potência da bomba na nova condição. A redução de potência é obtida pela diferença entre as potências medidas antes e depois da troca de rotores. Para calcular a economia anual, era necessário saber qual é o regime de operação da bomba. A estimativa foi feita igualando-se o regime da bomba ao dos fornos, que pôde ser verificado graças ao registro de consumo de gás natural.

Método 2: Períodos de Referência e Pós-execução definidos via Curva Característica

Este método pode ser aplicado nos casos onde a rotação da bomba permanece constante e a vazão varia em função da variação na curva do sistema (abertura de válvula, variação de níveis, etc.). Os pontos de operação do período de referência e pós-execução serão determinados com base nas informações de fabricação da bomba e do acionamento.

O método poderá ser usado quando não existir registro de medição de potência elétrica da bomba e existir apenas registro de vazão. Por meio da curva de potência no eixo em função da vazão, fornecida pelo fabricante da bomba, e da curva de rendimento em função de carga do conjunto de tração (motores e, quando houver, inversores e acoplamentos), é possível traçar uma curva de potência consumida pelo motor em função da vazão da bomba. Como a vazão é registrada, é possível calcular a economia da seguinte forma:

- Substituindo-se as vazões do período de pós-execução na curva do período de referência, obtém-se a energia teórica que o equipamento iria consumir caso não houvesse a ação de eficiência energética.
- Substituindo-se as vazões do período de pós-execução na curva do período de pós-execução, calcula-se o consumo energético real.
- A diferença entre o primeiro e o segundo é a economia de energia elétrica.

Antes de aplicar esse método, será necessário verificar se a bomba está operando dentro do previsto na curva. Para isso, será necessária a medição de potência elétrica em pelo menos um ponto de operação. O método só poderá ser usado caso a diferença entre a potência elétrica medida nesse ponto e a prevista na curva seja menor que 5%.

Caso a consistência da curva característica não seja confirmada, poderão ser levantadas as curvas dos períodos de referência e pós-execução por meio de operação forçada, regulando-se a abertura de válvulas com base na medição de vazão e medindo-se a potência do motor em cada ponto.

Método 3: Levantamento Completo

Este método é aplicado para: a) vazão variável e rotação constante; b) vazão e rotação variáveis.

Ele não possui simplificações como nos casos anteriores, sendo, portanto, similar ao cálculo dos demais equipamentos apresentados, ou seja, segue a metodologia apresentada no item 03 do relatório:

- Por meio do levantamento de dados do período de referência, determina-se uma equação de consumo em função da produção (no caso da bomba é a vazão)
- Após a implantação da ação de eficiência energética, faz-se o levantamento de dados do período de pós-execução, e são coletados os dados de vazão e consumo
- Substituindo-se as vazões do período de pós-execução na equação do período de referência, calcula-se o consumo teórico que a bomba teria caso não houvesse a ação de eficiência
- Subtraindo-se desse consumo o consumo real medido no pós-execução, obtém-se a economia.

Para bombeamentos de fluidos onde não há variação significativa de densidade, em todas as situações em que antes da ação de eficiência energética a bomba operar com rotação fixa (sem inversor de frequência), não será necessário o monitoramento de pressão. Isso porque, para cada bomba, existe uma curva característica de potência em função de vazão, que definirá todas as suas condições de operação, independentemente de variações de processo, como mudança de aberturas de válvulas, variações de pressões e níveis em tanques, etc. Com o levantamento de dados de potência e vazão será possível obtê-la. Quando o processo permitir, o levantamento poderá ser feito por meio de operação forçada, regulando-se a abertura de válvulas.

Entretanto, quando houver variação da rotação da bomba no período de referência, não será possível definir uma única equação de potência em função de vazão. Neste caso, será necessário definir a diferença de pressão na bomba como uma variável independente e, conforme a metodologia descrita no item 3, dividir os períodos de referência e pós-execução em grupos em função das diferenças de pressão e realizar os cálculos sempre em mesma base.

Este procedimento deverá ser realizado exceto quando houver variação na rotação da bomba no período de referência, mas não houver qualquer variação na curva do sistema. Isto significa que não pode haver nenhuma alteração em aberturas de válvulas e nos níveis e pressões dos pontos de origem e destino no período de referência. Neste caso, também será possível obter uma única equação de potência em função da vazão para o período.

Em qualquer caso, quando houver alteração de densidade do fluido (comum no caso de bombeamentos de lama), ela deverá ser encarada como uma variável independente.

Os seguintes exemplos ilustram as situações citadas acima:

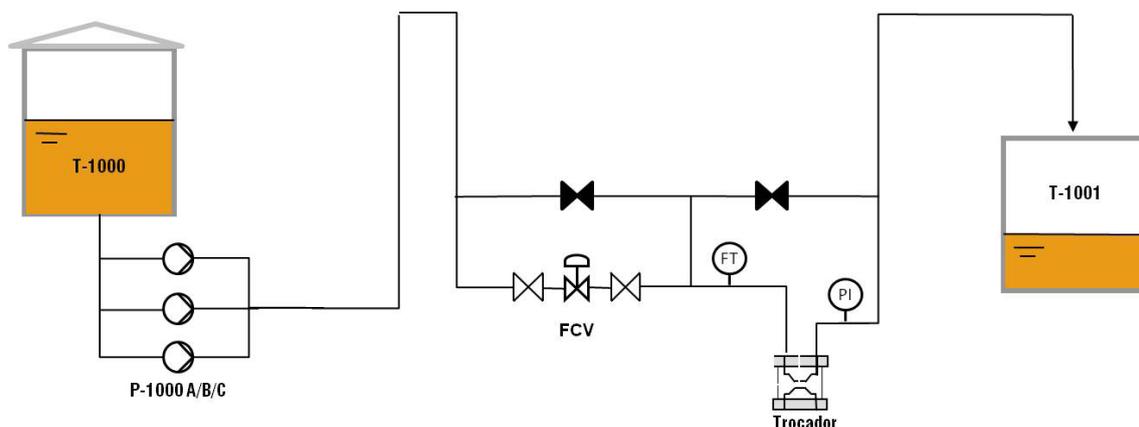
1. Casos onde a rotação da bomba não varia no período de referência e, portanto, não é necessário o monitoramento das pressões:
 - Situação antes da ação: Sistema com bomba superdimensionada e controle de vazão por

meio de válvula que, devido ao superdimensionamento da bomba, trabalha com pequenas aberturas. Ação: Substituição de bomba por equipamento menor ou redução da rotação. Consequência: Válvula trabalhando com maior abertura e bomba fornecendo menores pressões, resultando em redução de consumo elétrico.

- Situação antes da ação: Sistema com controle de vazão por válvula de controle. Ação: Substituição do controle por meio de válvula por controle via inversor de frequência. Consequência: Eliminação da perda de carga da válvula e bomba fornecendo menores pressões, resultando em redução de consumo elétrico.
 - Situação antes da ação: Sistema com vários consumidores, cada um deles com uma válvula de controle dedicada. Em determinados períodos do ano as válvulas trabalham bem fechadas (por exemplo, sistema de água gelada para ar condicionado no inverno). Ação: Instalação de inversor de frequência na bomba e de malha de controle que ajusta a rotação da bomba de modo a manter as válvulas de controle dos consumidores com aberturas maiores. Consequência: Redução de perda de carga nas válvulas e bomba fornecendo menores pressões, resultando em menor consumo elétrico.
2. Casos onde a rotação da bomba varia no período de referência e, portanto, é necessário encarar a diferença de pressão na bomba como uma variável independente:
- Situação antes da ação: Bombas dotadas de inversores de frequência para ajuste de vazão, que alimentam equipamentos sujeitos a grandes variações de pressão (por exemplo, algumas bombas de alimentação de caldeira que possuem inversor). Ação: Substituição de rotores desgastados por outros novos. Consequência: Redução de consumo elétrico.
 - Situação antes da ação: Sistema com vários consumidores, cada um deles com uma válvula de controle dedicada e presença de uma malha de controle que ajusta a rotação da bomba para maximizar a abertura das válvulas (equivalente ao item l.c. após a ação de eficiência) Ação: Substituição de bomba por outra mais eficiente. Consequência: Redução de consumo elétrico.
3. Caso onde a rotação da bomba varia no período de referência, mas a curva do sistema permanece constante, não sendo, portanto, necessário o monitoramento da diferença de pressão na bomba:
- Situação antes da ação: Sistemas de circuito fechado, dotados de bombas com inversores de frequência para ajuste de vazão. Ação: Substituição de bombas por outras mais eficientes. Consequência: Redução de consumo elétrico.

4.5.3 EXEMPLO – MELHORIAS NO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

FIGURA 18 - SISTEMA DE BOMBEAMENTO - EXEMPLO



Fonte: Elaboração Própria

As bombas P-1000 A/B/C são responsáveis pela transferência de uma solução X do tanque de armazenamento T-1000 para o tanque T-1001. A solução é aquecida no trocador de calor às placas localizadas no montante do tanque T-1001.

A operação de bombeamento é contínua e a vazão é modulada por uma válvula tipo borboleta com atuador eletropneumático que recebe sinal de uma malha de controle de vazão, com um medidor do tipo magnético.

Durante estudo de eficiência energética, constatou-se a existência de uma grande parcela de energia sendo dissipada na válvula de controle devido ao superdimensionamento da bomba e, por isso, a alternativa escolhida para melhorar o sistema foi a troca do rotor da bomba.

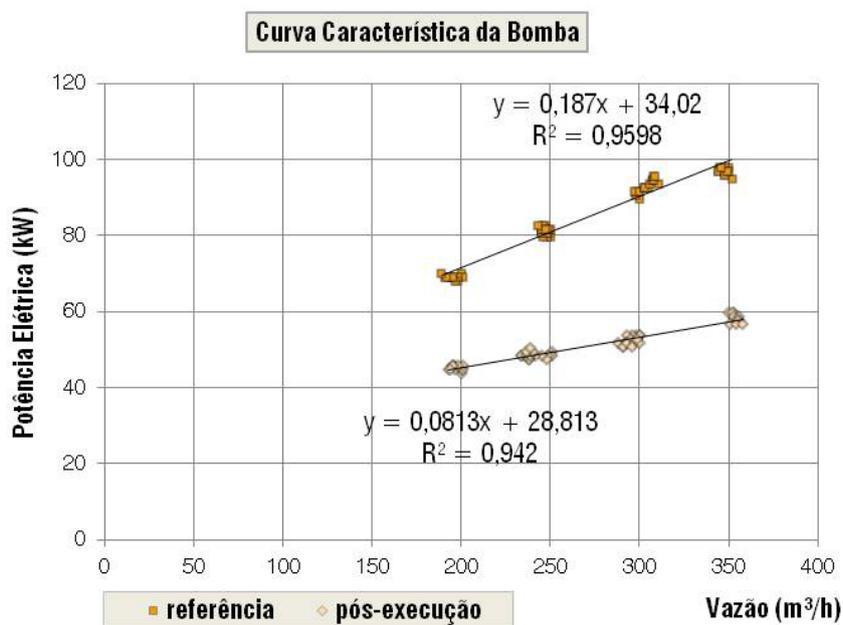
Durante o planejamento da M&V, verificou-se que:

1. A vazão oscila entre 200 e 400 m³/h;
2. Não existem dados de fabricante das bombas (curvas características);
3. Não existem medidores elétricos dedicados para cada bomba.

Como não havia medidores elétricos nas bombas e uma vez que o processo não era constante, adotou-se o Método 2 para a M&V. O procedimento adotado, já que não havia curva de fabricante, foi forçar a bomba, através da abertura da válvula de controle, em determinadas vazões de maneira a caracterizar alguns pontos de operação para a obtenção de curvas. Simultaneamente foram realizadas medições elétricas nas mesmas.

O procedimento foi realizado antes e depois das melhorias. Foram medidos 50 pontos em cada etapa, que foram suficientes para atender o critério de erro da economia (item 3.4.1). Cada ponto corresponde a valores médios de uma hora de medição. As seguintes curvas foram obtidas:

FIGURA 19 - CURVAS CARACTERÍSTICAS OBTIDAS



Fonte: Elaboração Própria

A partir das duas equações, foi calculada a economia horária através da seguinte fórmula:

$$Economia_i = Consumo_{antes_i} - Consumo_{depois_i} = \int_{antes} (Vazão_i) - \int_{depois} (Vazão_i)$$

A tabela abaixo apresenta os resultados das primeiras horas:

TABELA 8 - ECONOMIA HORÁRIA OBTIDA PARA O EXEMPLO DA BOMBA

Cálculo de Economia	Vazão	Consumo "Real"	Consumo Teórico	Economia	
	m ³ /h	kWh	kWh	kWh	MJ
03/07/10 06:00	195	70,5	44,7	25,8	92,9
03/07/10 07:00	191	69,7	44,3	25,4	91,4
03/07/10 08:00	193	70,1	44,5	25,6	92,2
03/07/10 09:00	195	70,5	44,7	25,8	92,9
03/07/10 10:00	250	80,8	49,1	31,6	113,9
03/07/10 11:00	354	100,2	57,6	42,6	153,4
03/07/10 12:00	357	100,7	57,8	42,9	154,5
03/07/10 13:00	360	101,3	58,0	43,2	155,6
03/07/10 14:00	362	101,8	58,3	43,5	156,6
03/07/10 15:00	365	102,3	58,5	43,8	157,7
03/07/10 16:00	368	102,8	58,7	44,1	158,8
03/07/10 17:00	371	103,4	59,0	44,4	159,8
03/07/10 18:00	374	103,9	59,2	44,7	160,9
03/07/10 19:00	376	104,4	59,4	45,0	162,0
03/07/10 20:00	379	104,9	59,6	45,3	163,0
03/07/10 21:00	382	105,5	59,9	45,6	164,1
...

Fonte: Elaboração Própria

A Economia total da alternativa é calculada por:

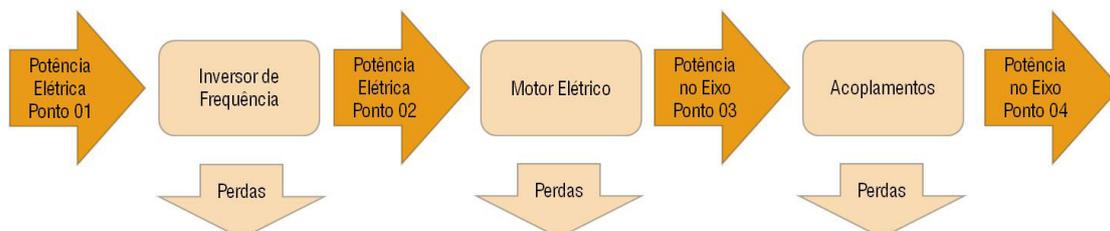
$$Economia_{total} = \sum_i Economia_i$$

A economia total final foi de 321.831 ± 3.032 kWh, o que representa 1.126.191 MJ para o ano de 2010. Esta economia evitou a emissão de 96 t CO₂/ano.

4.6 CONJUNTO DE TRAÇÃO

Os conjuntos de tração abordados são: Motores Elétricos, Inversores de Frequência e Acoplamentos

FIGURA 20 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA EM CADA EQUIPAMENTO



Fonte: Elaboração Própria

Foram definidos três métodos para o cálculo de energia evitada em conjuntos de tração. São eles:

- Método 1 – Ponto Único de Operação:
 - » Condições de operação constantes.
- Método 2 – Cálculo Acoplado com Equipamento de Processo:
 - » Condições de operação conhecidas.
- Método 3 – Ensaio:
 - » Condições de operação desconhecidas.

Método 1: Ponto Único de Operação

Este método pode ser aplicado apenas quando o equipamento de processo trabalhar em regime constante. Neste caso a potência elétrica consumida pelo sistema será constante, o que deve ser verificado por meio de um acompanhamento dessa medição, ainda no período de planejamento do M&V.

Nesta situação, será necessário apenas fazer uma comparação direta do consumo elétrico do período de referência e do período pós-execução. Para isso, deverão ser medidas as potências elétricas em cada um dos períodos.

Para calcular a economia total anual, será necessário saber qual é o regime de operação do sistema, ou seja, quantas horas por ano ele opera. Caso haja um registro do consumo elétrico (ou de algum parâmetro de processo), será possível determinar o regime de operação. Caso não haja, este valor poderá ser estimado com base no regime de operação de outro equipamento do mesmo processo, que opera junto com o sistema em questão, e que possui registros de parâmetros de processo que possibilitem distinguir os momentos de operação e parada (consumo elétrico, consumos de combustíveis, produção, etc).

Método 2: Cálculo Acoplado com Equipamento de Processo

Este método será utilizado quando for possível fazer a análise conjunta do sistema de tração com o equipamento movido. Ele será utilizado para conjuntos de tração de bombas e ventiladores.

A análise será idêntica à das bombas, descrita no item 4.5. A diferença está apenas no foco da ação de eficiência energética, que em vez de ser a bomba, será o motor, o acoplamento ou o inversor. O processo de M&V não será alterado. Mesmo para o caso do ventilador a análise também será idêntica à das bombas. Vale ressaltar que, no caso dos ventiladores, é necessária uma atenção especial às variações de densidades (tratada como uma variável independente).

Método 3: Ensaio

Nos demais casos, serão necessários ensaios para determinar a curva de eficiência do conjunto de tração, alvo da ação de eficiência energética, dos períodos de referência e pós-execução.

No caso dos inversores de frequência, o levantamento das curvas poderá ser feito em campo, já que é possível medir a potência elétrica na entrada e na saída do equipamento. Por outro lado, para motores e acoplamentos, serão necessários ensaios em dinamômetros.

Além das curvas de eficiência do período de referência e pós-execução, será necessária a medição e o registro do consumo elétrico do período de pós-execução.

O cálculo da economia será realizado da seguinte forma:

1. Para cada intervalo do período de pós-execução (ponto de operação), multiplica-se o consumo

elétrico medido pelo rendimento correspondente àquela carga, obtido na curva de pós-execução gerada no ensaio. Com isso será obtida a energia útil de todos os pontos de operação.

2. Para cada intervalo, divide-se a energia útil pelo rendimento do período de referência para a carga correspondente, obtendo-se a energia teórica que o equipamento iria consumir caso não houvesse a ação de eficiência energética.
3. A energia economizada em cada intervalo é obtida subtraindo-se o consumo real, medido, desse consumo teórico, calculado.
4. A soma das economias dos intervalos corresponde à economia total do período de pós-execução.

5.REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço de Energia Útil BEU 2005**. Brasília: MME, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação da Eficiência Energética na Indústria e nas Residências no horizonte decenal (2010-2019)** : nota técnica DEA 14/10. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; ELETROBRÁS; PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Eficiência energética na indústria** : o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília: CNI, 2009.

EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição, Verificação e Performance PIMVP 2010** : conceitos e opções para a determinação de economias de energia e de água. [S.l.]: EVO, 2007. v. 1.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2011**. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

HABERL, J. S.; CLARIDGE, D. E.; CULP, C. **Ashrae's guideline 14-2002 for measurement of energy and demand savings** : how to determine what was really saved by the Retrofit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR ENHANCED BUILDING OPERATIONS, 5., 2005, Pittsburgh, Pennsylvania. Proceedings... Pittsburgh, Pennsylvania: [s.n.], 2005.

PROGRAMA Brasileiro GHG Protocol. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Gerência de Infraestrutura

Gerente: *Wagner Ferreira Cardoso*

Equipe Técnica: *Rodrigo Garcia e Francine Vaurof*

Conselho Temático de Infraestrutura – COINFRA

Presidente: *José de Freitas Mascarenhas*

DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO – DIRCOM

Diretor de Comunicação: *Carlos Alberto Barreiros*

Gerência Executiva de Publicidade e Propaganda – GEXPP

Gerente Executiva: *Carla Cristine Gonçalves de Souza*

Produção Editorial: *Grifo Design*

DIRETORIA DE SERVIÇOS CORPORATIVOS – DSC

Área de Administração, Documentação e Informação – ADINF

Gerente Executivo: *Marcos Tadeu*

Gerência de Documentação e Informação – GEDIN

Gerente de Documentação e Informação: *Fabiola de Luca Coimbra Bomtempo*

Normalização: *Claudia Valentim*

Produção Editorial: *Grifo Design*

Revisão: *Olik Comunicação*

Embaixada Britânica

Juliana Falcão

Luciana Carrijo

Tatiana Coutinho

Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres – ABRACE

Camila Schoti

Fernando Umbria

Helder Sousa

Luciano Pacheco

FIGENER Consultores de Engenharia

Cinthia Yoshie Udakiri

Frederico Miura

Marcelo Yoshihiro Fukumoto

Pedro de Almeida Pacheco Amaral

Carlos Nardocci

Colaboração

Carlos Nardocci

Solvay

Carolina Tiemi Barbosa

CSN

Daniel Bittencourt de Souza

Suzano Papel e Celulose

Daniel Henrique Soares

Votorantim

Everson Moraes

Braskem

Fabiano Fuga

Linde

Fábio Almeida Chaves

Vale

<i>Fábio Luis Heineck</i>	Gerdau
<i>Flávio Kiyoshi Kano</i>	Air Liquide
<i>Marcelo Amaral Nascimento</i>	Anglo American
<i>Marcelo José Alves</i>	CSN
<i>Marcelo Ribeiro</i>	Vale
<i>Marcelo Wasem</i>	Braskem
<i>Nélio Ceribelli</i>	Paranapanema
<i>Paulo Cruz</i>	Vale
<i>Roberto Nicolas de Jardin Jr.</i>	Carbocloro
<i>Roberto Luiz Schaefer</i>	Votorantim
<i>Sérgio de Souza</i>	Dow Corning
<i>Sérgio Grassi F. Marques</i>	VMB

Apoio:



Embaixada Britânica
Brasília

Realização:



ISBN 978-85-7957-072-8



9 788579 570728