



XVII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR

São Paulo Expo – 23 à 25 de novembro de 2021

A IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES DO PROTOCOLO INTERNACIONAL DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE - PIMVP

PAPER 14

RESUMO

Com a exponencial evolução da tecnologia e suas máquinas elétricas bem como o conceito de eficiência energética, cresce também a necessidade de se aferir os resultados energéticos de forma confiável e consolidada. Existem diversas frentes de projetos e de novos equipamentos que são classificados como eficientes e tem como objetivo central a redução do consumo elétrico e preservação dos recursos finitos que geram energia. Paralelamente a este fenômeno, o PIMVP foi elaborado por um conjunto de especialistas da EVO (Efficiency Valuation Organization) com o objetivo de orientar e nortear as medições e verificações de performance para sistemas elétricos com foco em eficiência energética. O protocolo permite matematicamente aferir com precisão os reais valores de economia de uma determinada ação de eficiência energética, ou seja, por diversas vezes não será possível determinar os resultados através de expressões lineares ou de comparativos diretos entre os períodos de linha de base (antes da execução do projeto) e de determinação da economia (após a execução do projeto), como por exemplos, reduções de consumo de energia em ambientes com variação de carga como linhas de produção ou centrais térmicas. No estudo de caso deste artigo, por meio da aplicação do PIMVP, foi possível aferir nos períodos ex-ante e ex-post uma redução em torno de 6% do consumo em uma central térmica sendo equivalente a aproximadamente 100 MWh por mês.

Palavras-chave: Eficiência energética. Linha de base. PIMVP. Performance. Confiança

ABSTRACT

With the exponential evolution of technology and its electric machines, as well as the concept of energy efficiency, the need to measure energy results in a reliable and consolidated manner also grows. There are several project fronts and new equipment that are classified as efficient and have as central objective the reduction of electrical consumption and the preservation of finite resources that generate energy, in parallel to this phenomenon, the IPMVP was prepared by a group of specialists from EVO (Efficiency Valuation Organization) with the objective of guiding and guiding measurements and performance checks for electrical systems with a focus on energy efficiency.

The protocol allows mathematically to accurately measure the real savings values of a given energy efficiency action, that is, on several occasions it will not be possible to determine the results through linear expressions or direct comparisons between the baseline periods (before the execution of the project) and determination of savings (after the execution of the project), such as, for example, reductions in energy consumption in environments with varying loads such as production lines or thermal power plants. In the case study of this article through the application of IPMVP it was possible to verify in the ex-ante and ex-post periods a reduction of around 6% of the consumption in the thermal power plant, being equivalent to approximately 100MWh per month.

Keyword: Energy efficiency. Baseline. IPMVP. Performance. Confidence

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente evolução da tecnologia, a necessidade do consumo elétrico (substituindo fontes não renováveis) também entra em evidência, com isso, o conceito e prática da EE (eficiência energética) passaram de coadjuvantes para tema central das ações da humanidade em futuro muito próximo.

O PIMVP desde sua criação tem como “visão” orientar aos profissionais especializados em eficiência energética quanto à necessidade de se calcular com determinada precisão os resultados e fazer uma comparação coerente entre o “ex-ante¹” e “ex-post²” dos projetos e suas execuções.

Estima-se que um motor de processo fabril com produção variável ao ser automatizado com um sistema supervisor e inversor de frequência economize em torno de 30% de seu consumo, isto é possível uma vez que o sistema supervisor conseguirá calcular a necessidade de aceleração e desaceleração do eixo do motor baseado na demanda final (vazão de água gelada ou ar de insuflação, por exemplo), logo os picos de corrente são mitigados e a potência tende a ser controlada quanto a sua necessidade de utilização, portanto, o uso “inteligente” da potência deverá gerar economias. A correta aplicação matemática na teoria em comparação ao realizado resultará na real economia alcançada mesmo que este número não seja necessariamente menor quando comparado à linha de base.

Existem conceitos de eficiência energética que vão além do simples retrofit de equipamentos por modelos superiores, a economia de energia pode ser alcançada com mudanças de hábitos ou alterações nas cargas., Baseado nesta premissa, este trabalho tem como objetivos demonstrar, por meio de exemplo prático em central de água gelada, a aplicação do PIMVP para aferir os resultados em um projeto não convencional de EE, bem como evidenciar a importância da correta medição e verificação dos resultados obtidos a fim de dar maior credibilidade e assertividade ao conceito, entretanto Starosta (2018), em seu artigo chama atenção para números de economia de energia acima dos 3% considerando em específico estes efeitos interativos como distorções harmônicas, reativos, fator de potência e outros.

O presente trabalho apresenta a aplicação da metodologia do protocolo em um estudo estatístico, amostral, de regressão e correlação para um projeto pioneiro de compensação de energia reativa em tempo real para a central de água gelada de um complexo hospitalar.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Atualmente existem 213 modelos de lâmpadas LED de 27 diferentes fornecedores, 906 modelos de equipamentos de ar condicionado de 30

¹ baseado em suposição e prognóstico, sendo fundamentalmente subjetivo e estimativo

² baseado em conhecimento, observação, análise, sendo fundamentalmente objetivo e factual

diferentes fornecedores, 241 placas solares homologadas pelo PROCEL de 41 fornecedores diferentes, com EE testada e com referência de mercado quanto a sua alta capacidade (FONTE, PROCEL). Ainda podemos elencar a Portaria 20 do INMETRO publicada em sua primeira revisão na data de 15 de fevereiro de 2017 que normatiza e regulamenta luminárias de Iluminação Pública e lâmpadas de uso interno LED e as constantes alterações e consultas públicas sobre a Resolução 482 da ANEEL publicada em 2012 que regulamenta o setor de geração distribuída (energia fotovoltaica solar), bem como as revisões das normas NBR 5101 – Iluminação pública – Procedimento e a NBR 5410 – Baixa tensão pela ABNT.

Com a atual crise financeira nacional e com o advento da pandemia, especialistas do setor afirmam que os contratos de desempenho energético serão uma alternativa viável para a continuação da EE no Brasil (informação verbal³), bem como, a retomada do investimento, modalidade esta que se baseia em um payback que será pago com a resultante da economia de energia oriunda do projeto, ou seja, aferir com precisão os resultados significa um payback menor e confiança de mercado para este tipo de contrato.

De forma racional o protocolo tem como objetivo trazer para o campo da estatística e matemática os números da economia, sendo esta parte decisiva entre o correto e o incorreto.

A protocolo ainda orienta que após definição dos métodos e fixar os valores que servirão para a linha de base e para o período de determinação da economia, a escolha de uma ou várias opções de medição dependendo da complexidade das AEE's, para tanto o PIMVP apresenta 4 opções:

- Opção A - Medição Isolada da AEE: Medição dos parâmetros-chave;
- Opção B - Medição isolada da AEE: Medição de todos os parâmetros;
- Opção C - Toda a Instalação;
- Opção D - Simulação calibrada

Granderson et al. (2016) aplicaram os conceitos no PIMVP em edifícios comerciais comparando seu consumo com a temperatura externa, onde o objetivo era estatisticamente encontrar resultados confiáveis sobre a análise com o intuito de atrair investidores para projetos de eficiência energética. Foram analisados mais de 500 edifícios com dois métodos para aferição dos resultados baseados no protocolo, métodos com cálculos por CV e Median NMBE.

Segundo PIMVP, “cv” é o coeficiente de variância, definido como o desvio padrão das leituras (s) dividido pela média (y). Até que a média real e o desvio padrão da população possam ser estimados a partir de amostra reais

Sendo sua equação geral:

³ Notícia fornecida pelo sócio diretor da empresa Ação Engenharia, José Starosta em junho/2020

$$cv = \frac{s}{y} \quad (1)$$

MBE (Mean Bias Error), é a média dos erros de um espaço amostral. geralmente, é um bom indicador do comportamento geral dos dados simulados em relação a linha de regressão da amostra. Na Equação (2), m_i é o valor medido, s_i é o simulado e n o número de pontos de dados medidos (RUIZ; BANDERA 2017).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{n} \quad (2)$$

Logo MNBE (Normalized Mean Bias Error) é uma normalização do índice MBE que é usado para dimensionar os resultados do MBE, tornando-os comparáveis.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Para que um projeto possa ser iniciado com segurança, um correto levantamento em campo das possibilidades de AEE deve ser realizado bem como a construção, mesmo que inicial, de uma curva “ABC” e o recolhimento das informações sobre os hábitos e períodos de consumo. Estas informações servirão para a elaboração da linha de base de consumo, um dos pilares de sustentação do MeV.

Os resultados das aplicações práticas deste artigo seguiram estritamente os passos acima indicados.

3.1 Aplicação 1 – MeV em central térmica hospitalar

Este projeto foi elaborado e executado em uma central térmica (CAG) de um grande hospital da capital paulista que conta com 5 chillers, bombas primárias e secundárias alimentada por 3 transformadores, totalizando 3400 TR.

A ação de eficiência energética consistia na manobra do TAP dos transformadores para que a tensão primária fosse elevada e como consequência a tensão secundária sofresse uma redução ficando assim mais próxima à nominal de alimentação das máquinas 440 V. É comum que grandes cargas, principalmente as críticas, fiquem com tensões elevadas operando acima da nominal, esta manobra visa evitar que oscilações a montante, que causam afundamentos na tensão, acionem proteções de sobtensões e causem interrupções na alimentação. A AEE proposta consistia na instalação de banco de capacitores com controlador com atuação instantânea (em até 16 ms) onde os afundamentos foram compensados e corrigidos evitando risco à carga mesmo com tensões no seu nível nominal. Manobras de TAP em transformadores são objeto de estudos diversos, Rosa et.al (2007) em seu artigo analisou manobras automáticas através de

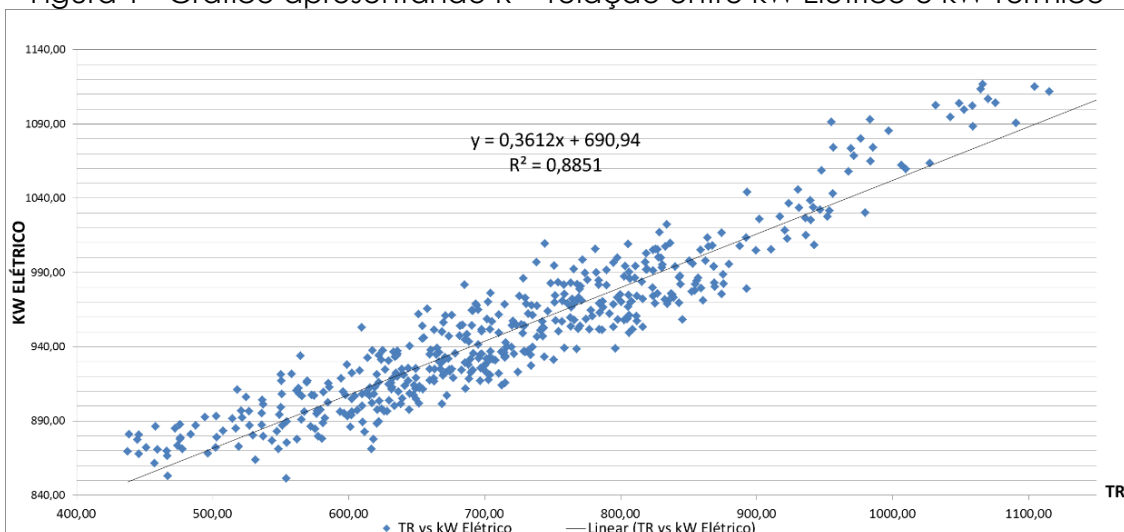
tecnologia fuzzy, para mitigar os erros humanos e automatizar o procedimento como forma de compensar os afundamentos de tensão, nesta AEE os afundamentos serão compensados pelos capacitores com um controlador lógico com programação embarcada. Este processo resultaria em um melhor aproveitamento da energia, confiabilidade da carga, ajuste dos níveis de tensão conforme projeto e finalmente eficiência energética (economia de energia).

A central possuía sistema supervisor com controles individuais das bombas e chillers, porém à época sua automação para controle dos carregamentos de cada máquina ainda não havia sido implementado, sendo seu controle manual, ou seja, os chillers eram acionados conforme a demanda do complexo, logo, foi possível fazer um paralelo com uma linha de produção onde, para se ter um correto resultado energético, a demanda de produção (ou geração de frio) deveria ser similar antes e depois das AEEs. O PIMVP foi aplicado uma vez que a demanda requerida, além de variar com a necessidade dos pacientes, médicos e usuários, ainda sofria com a variação da temperatura. Quando um fator interfere diretamente ao consumo energético e está fora da sua fronteira de medição é dado o nome de “fator interativo”.

Assim foi definida a linha de base energética (antes da alteração nos bancos de capacitores), inicialmente foi preciso definir um período onde houve uma consistência na utilização dos chillers, dados retirados do sistema supervisor.

Definida como linha da base a semana de 07/08/2017 até 13/08/2017, onde apenas os chillers 1, 2 e 4 funcionaram ininterruptamente, foi possível correlacionar, após este período, as variáveis a fim de certificar se a relação entre consumo e geração de frio (TR) era consistente. O PIMVP informa que relações quadráticas (regressões lineares) acima de 0,75 são satisfatórias para se desenvolver os cálculos, assim a figura 1 mostra o R^2 para este período.

Figura 1 - Gráfico apresentando R^2 - relação entre kW Elétrico e kW Térmico



Fonte: autor

Com uma linha de base consistente foi possível definir a estratégia de MeV, sendo esta a “Opção B - Isolamento da AEE: Medição de todos os parâmetros” vide PIMVP, Tópico 4.7.2, que define:

“Medição de Todos os Parâmetros, requer a medição de todas as quantidades de energia da Equação 1), ou de todos os parâmetros necessários para calcular a energia.”

Logo, para a correta realização do M&V conforme descrito na “Opção B”, foram avaliados os seguintes pontos para comprovação da Ação de Eficiência Energética:

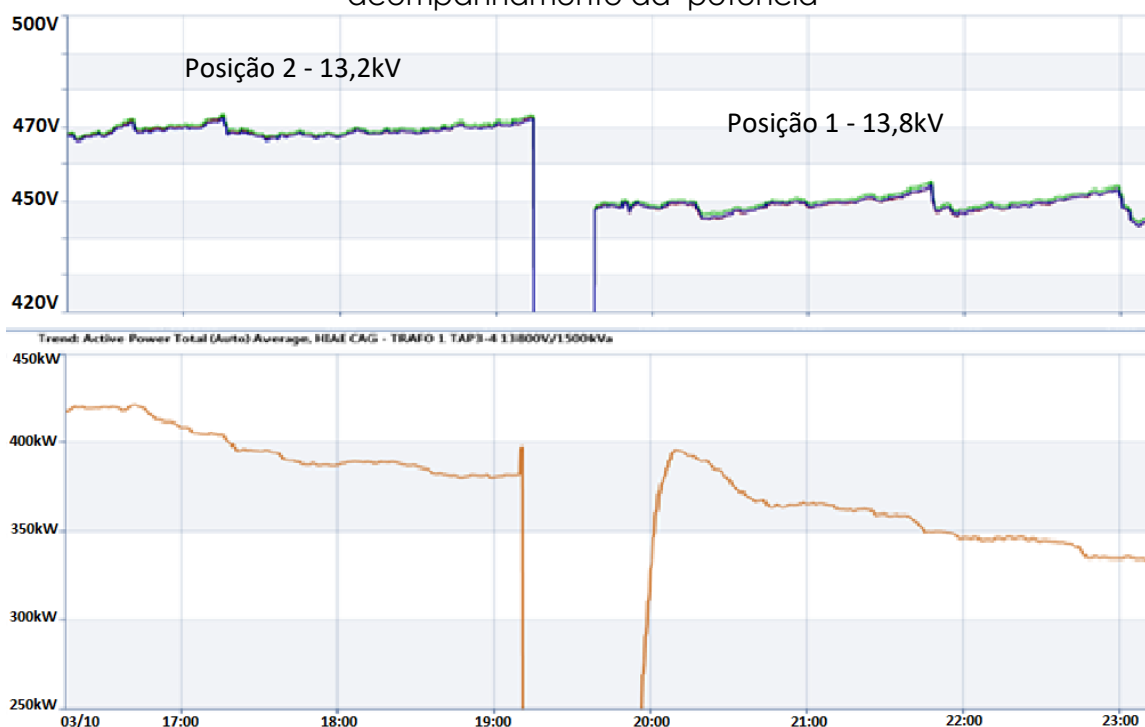
- Medições de todas as variáveis a serem analisadas e comparadas em linha de base, tais quais, consumo, potência, capacidade térmica, COP, carregamento, temperatura externa de bulbo úmido e todas as demais necessárias para a realização dos cálculos de economia;
- Definições de variáveis independentes, no caso, temperatura externa de bulbo úmido;
- Definições dos fatores estáticos, neste caso, transformadores e os conjuntos dos *chillers* existentes na instalação;
- Utilização de medidores de energia calibrados.

Só foi possível definir como “Opção B”, pois o sistema supervisor tinha dados históricos e memória de massa das medições, assim foi possível realizar o “upgrade” do controlador do banco de capacitores para a tecnologia “Equalizer” onde a o tempo de resposta da compensação de energia reativa pelos capacitores passou a ser de até 16 ms.

3.2 Medições Iniciais e alteração do TAP dos transformadores

Nota-se na figura 2 que após a manobra no TAP, acompanhando a redução da tensão, houve também uma redução na potência. Como a demanda de frio está diretamente ligada à redução ou aumento da potência consumida pelos *chillers*, o PIMVP orienta que seja feito um controle de “produção” e, se necessário, ajuste de rotina ou não rotina na linha de base.

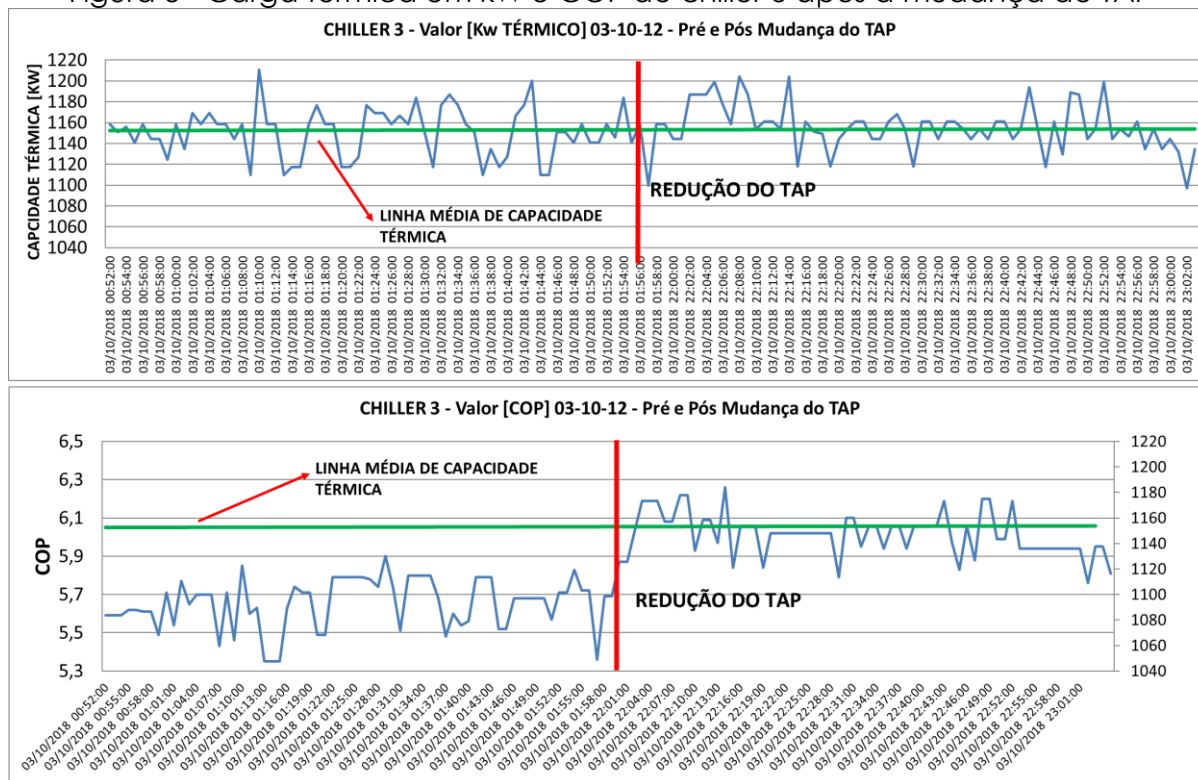
Figura 2 - Alteração do TAP - Redução da tensão no secundário do Trafo e acompanhamento da potência



Fonte: Autor

A figura 3 mostra que a variação da carga térmica continuou típica após a manobra, cabe ressaltar que após a alteração na tensão houve um ligeiro aumento no COP do equipamento (chiller 3).

Figura 3 - Carga térmica em kW e COP do chiller 3 após a mudança do TAP

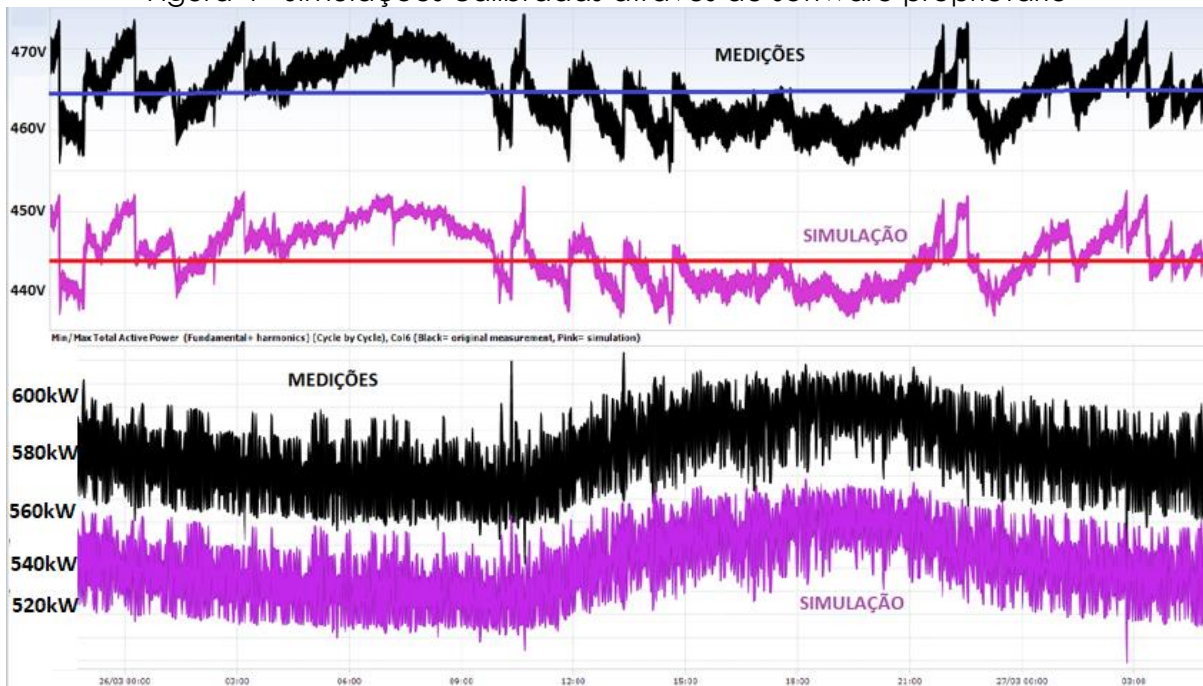


Fonte: autor

Ainda como parte da linha de base, foram realizadas simulações calibradas das reduções de potência oriundas da manobra no TAP. Apesar da opção adotada ter sido a “B”, simulações calibradas fazem parte da opção “D”, neste caso o PIMVP orienta manter a opção definida e complementar o estudo.

A figura 4 apresenta os resultados da simulação calibrada com software dedicado, nota-se que após simular a entrada do controlador com o banco de capacitores há uma mudança no comportamento da carga, a tensão após a manobra do TAP é reduzida em aproximadamente 5% ficando próximo os valores nominais na rede e por consequência a potência demandada também é reduzida.

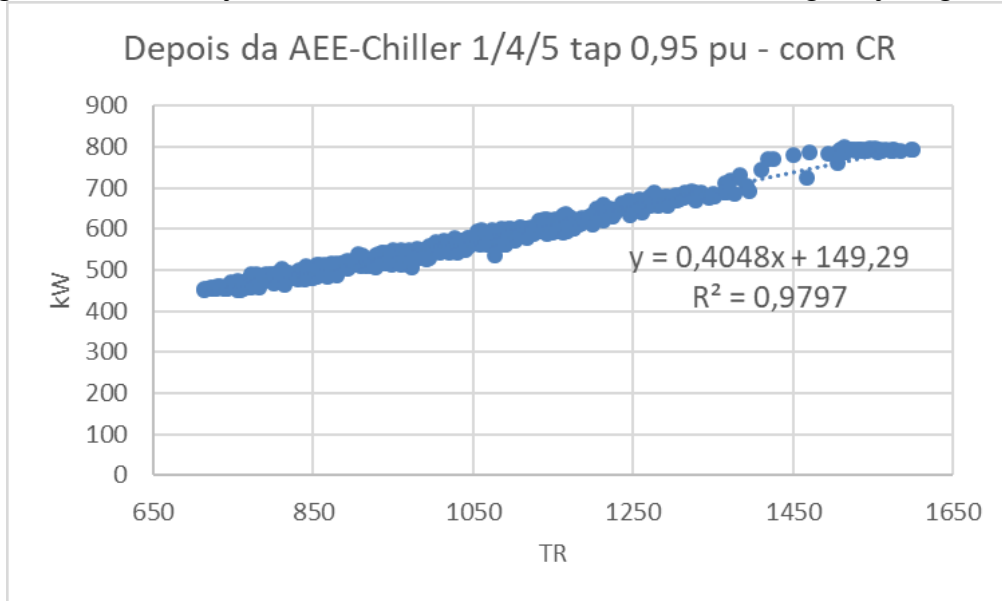
Figura 4 - Simulações calibradas através de software proprietário



4 MeV final – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a AEE foi novamente calculada a curva de correlação com as mesmas variáveis anteriores, conforme a figura 5.

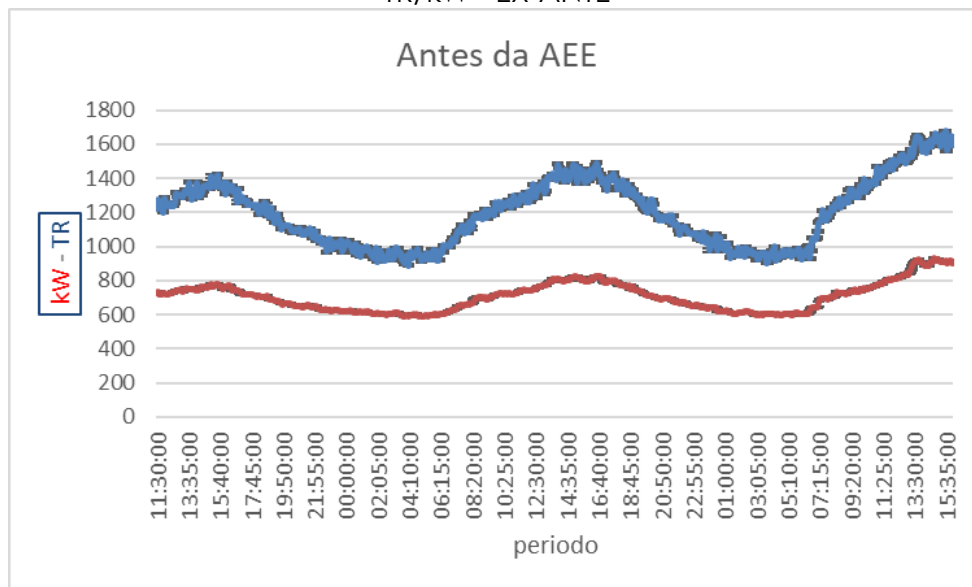
Figura 5 - Correlação entre kW elétrico e Tonelada de refrigeração gerada



Fonte: Autor

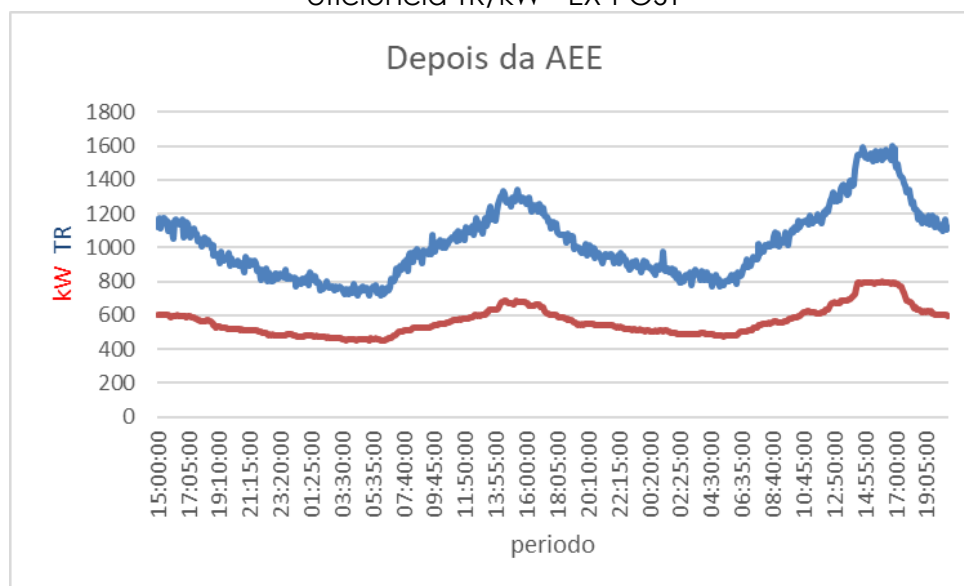
Considerando os dois períodos, ex-ante e ex-post, dentro de uma mesma base de consumo e geração de carga térmica (períodos e máquinas), foi possível traçar novamente os consumos conforme as figuras 6 e 7.

Figura 6 - Geração de carga térmica e kW elétrico consumo - Relação de eficiência TR/kW - EX-ANTE



Fonte: Autor

Figura 7 -- Geração de carga térmica e kW elétrico consumo - Relação de eficiência TR/kW - EX-POST



Fonte: Autor

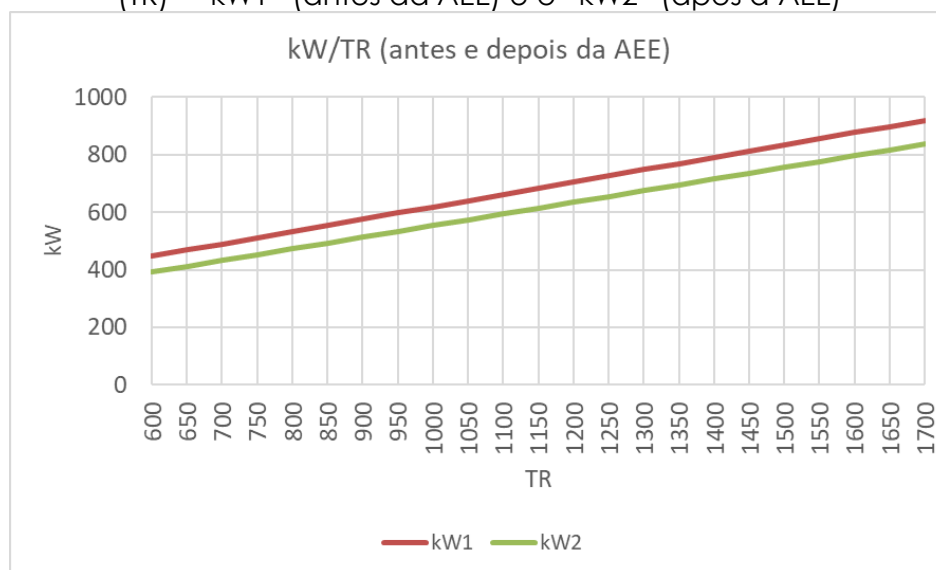
Notadamente, correlacionando os carregamentos no mesmo ponto houve um considerável aumento no rendimento do sistema, logo foi possível concluir que houve também uma redução do consumo após a ação de eficiência energética, o comparativo é mostrado abaixo na tabela 1 e figura 8.

Tabela 1 - Resultados

Período	TRh - total	kWh - total	kW/TR - médio
Pré - AEE	63.030,36	37.052,34	0,588
Pós - AEE	54.961,84	30.245,09	0,550
Economia [%]			6,36%

Fonte: Autor

Figura 8 - Relação ex-ante e ex-post entre potência (kW) e capacidade frigorífica (TR) - "kW1" (antes da AEE) e o "kW2" (após a AEE)



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Dentro de uma fronteira de medição com um consumo muito elevado e com inúmeras variáveis que atuam diretamente na variação de energia, o PIMVP estatisticamente nos proporciona correlacionar períodos diferente com produções diferentes e mesmo assim aferir com grande precisão os resultados. Dentro desta aplicação a economia alcançada no MeV final foi de 6,39% ou 7,00 MWh em um período de 50 horas.

Em um cálculo simplificado, considerando a tarifa paga pelo hospital à época, de aproximadamente 0,65 R\$/kWh, a economia em reais foi da ordem de 4.550 R\$/50horas ou 65.000 R\$/mês, contudo, não seria possível creditar 95% de confiança para 10% de precisão através de medições comuns e cálculos convencionais como por exemplo análise das contas de energia.

Os resultados poderão ser ratificados trazendo as análises para os meses atuais. Com a definição da linha de base, o período de determinação da economia poderá ser remodelado ano a ano, semestre a semestre dependendo dos indicadores locais.

Em suma, os projetos de eficiência energético quando bem elaborados e implementados podem trazer grandes resultados de economia, entretanto nem sempre bons projeto trazem resultados lineares, PIMVP neste caso, é de grande valia não só para ratificar informações errôneas como também serve para aferir com precisão a EE em trabalhos complexos com grau elevado de incerteza e muitas variáveis, ainda em alguns casos, o protocolo é capaz de mudar o rumo de implementações ou ajustar AEE conforme demonstrado no resultado final do artigo técnico (Nodomi; Lacerda, 2021) onde foi possível afirmar através de regressões lineares e ajustes de linha de base que os resultados alcançados não são confiáveis e elencar hipóteses sobre os erros e trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores do SENAI em especial aos que lecionaram no curso de climatização.

Agradeço meus pais e familiares por estarem sempre comigo e principalmente por falarem o que preciso escutar não o que quero escutar.

Agradeço em especial minha futura esposa por estar comigo e ter uma paciência sobrenatural.

Agradeço imensamente a empresa Ação Engenharia em especial seu sócio diretor Eng^o José Starosta pelos ensinamentos, oportunidades e por ceder às informações do estudo de caso que foi desenvolvido na empresa.

Agradeço a empresa Elspec detentora da tecnologia pioneira em controladores de banco de capacitores em tempo real que viabilizou o estudo de caso deste artigo.

REFERÊNCIAS

CINASE DIGITAL 1º DIA, 2020, São Paulo. Anais eletrônicos [...]. São Paulo: O Setor Elétrico, 2020. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=SGTuuOu_IGY&ab_channel=osetoreletrico. Acesso em maio 2021

EVO, EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION, Measurement & Verification – Issues and Examples, EVO: 2019

EVO, EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance – Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água - vol. 1 - EVO 10000 – 1:2012 (Br). Sofia: EVO, 2012

EVO, EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION, Statistics and Uncertainty for IPMVP - International Performance Measurement and Verification Protocol, EVO: 2014.

Granderson J., Touzani S., Custodio C., Sohn M.D., Jump D. and Fernandes S., 2016. Accuracy of automated measurement and verification (M&V) techniques for energy savings in commercial buildings. Applied Energy, 173, pp.296-308.

Nadoni, K.E.; Rogério, S.L. Modelo de consumo de energia da trefilagem, Eletricidade Moderna, Brasil, 2021, 1–6.

_____. NBR ISO 50001 Sistemas de gestão da energia - Requisitos com orientações para uso. São Paulo: ABNT, 2018.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, São Paulo, 2021. Disponível em <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>. Acesso em fevereiro 2021.

ROSA et al. Ajuste de tap de transformadores para controle de tensão de subestações de energia elétrica usando controlador fuzzy. Congresso Brasileiro de Redes Neurais, FEI. Disponível em <<https://fei.edu.br/sbai/SBAI2007/>>. Acesso em fevereiro 2021

Ruiz, G.R.; Bandera, C.F. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. , Energy, Spain, 2017, 1–19.

Starosta, José. Eficiência energética – somos enganados? Afinal, como avaliar os resultados?, São Paulo, O Setor Elétrico, 2018 . Disponível em <https://www.osetoreletrico.com.br/eficiencia-energetica-somos-enganados-afinal-como-avaliar-os-resultados/>. Acesso em fevereiro 2021