



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA PARA CÁLCULO DA ECONOMIA DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES DO SISTEMA ELETROBRAS SEGUINDO AS ORIENTAÇÕES DO PIMVP

SAMUEL MOREIRA DUARTE SANTOS(1); LUCIANA DIAS LAGO MACHADO(2); ESTEFÂNIA NEIVA DE MELLO(2)
ELETROBRAS(1); CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS SA(2)

RESUMO

Ferramenta computacional desenvolvida para auxiliar na M&V de projetos de eficiência energética em edificações corporativas do sistema Eletrobras. Em função dos dados das faturas de energia e de dados climáticos, é calculado o GDR e GDA mensal, que são as opções de variáveis independentes, em conjunto com o percentual de ocupação. A linha de base é obtida correlacionando o consumo de energia da edificação com a(s) variável(is) independente(s) selecionada(s). Obtendo uma equação matemática para a linha de base em função de até 3 variáveis independentes simultaneamente. Para validação dos resultados é praticada uma análise estatística dos dados.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramenta computacional; M&V; Linha de base; Eficiência energética

1.0 INTRODUÇÃO

Com o atual modelo de desenvolvimento econômico, o fornecimento de energia não consegue atender a crescente demanda em muitos países, situação que não é diferente no Brasil. Para resolver o problema de abastecimento de energia e também para proteger o meio ambiente e mitigar as mudanças climáticas, são desenvolvidas fontes de energia renováveis e diversas ações de eficiência energética. No Brasil, a Eletrobras, enquanto executora do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel desde 1985, tem uma atuação histórica e de reconhecimento internacional, na área de eficiência energética.

No que se refere às ações internas, desenvolvidas pelas empresas do Grupo Eletrobras, destacamos as ações do Comitê Integrado de Eficiência Energética do Sistema Eletrobras – CIEESE — que atua como gestor desta Política de Eficiência Energética das Empresas Eletrobras, promovendo sua implementação, divulgação, acompanhamento e avaliação nas empresas do grupo. Foram definidas metas de economia de energia, considerando o consumo de energia do ano base, definido por cada empresa para cada uma das edificações escolhidas.

A ferramenta computacional apresentada neste informe técnico foi então desenvolvida para dar suporte ao acompanhamento das metas definidas para as edificações corporativas das empresas do grupo. Para tanto, ela deveria utilizar o máximo de informações disponíveis mitigando a necessidade de custos adicionais.

Talvez o método mais simples de medir a economia de energia devido a uma Ação de Eficiência Energética - AEE isolada ou a um conjunto de AEEs seja comparar diretamente o consumo de energia no PDE com o PLB, respectivamente Período de Determinação da Economia e Período da Linha de Base. Este método pressupõe implicitamente que a mudança no consumo de energia entre PLB e PDE é causada exclusivamente pela(s) AEEs. No entanto, o consumo de energia em edifícios corporativos também é influenciado por outros fatores, incluindo condições climáticas, níveis de ocupação e procedimentos operacionais de HVAC - todos os quais podem mudar entre os períodos mencionados. Se essas mudanças não forem contabilizadas, a economia determinada por esse método simples estará incorreta.

Portanto, o sucesso desses projetos precisa ser determinado, verificando adequadamente se as metas pactuadas de economia de energia foram alcançadas por meio de ações de eficiência energética e não apenas por questões circunstanciais, tais como um período de calor mais ameno, ou por um número elevado de funcionários de férias. Esse processo é denominado de medição e verificação (M&V).

Como o consumo de energia em grandes edifícios comerciais é uma função complexa das condições climáticas, características do edifício, uso do edifício, características do sistema e tipo de equipamento de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado - HVAC usado, um modelo de Regressão Linear Múltipla - MLR fornece melhor precisão do que um modelo de variável única para modelar o consumo de energia. Assim, se os dados de consumo de energia de todo o edifício dependente do clima e da ocupação forem usados para medir a economia, essas

técnicas são igualmente apropriadas para determinar a economia de uma AEE de iluminação ou de uma AEE de um chiller, por exemplo, uma vez que se está trabalhando com toda a edificação.

O objetivo deste Informe Técnico é mostrar a ferramenta computacional desenvolvida, no âmbito do CIEESE. Para isso, foi organizado este Informe Técnico com seis seções divididas em uma introdução, três seções de desenvolvimento, uma conclusão e, por fim, as referências utilizadas. Na seção 2, foi feita uma revisão da literatura como forma de perceber o estado da arte nessa temática. Na seção 3, são apresentados aspectos técnicos e conceituais relativos ao assunto em questão. A seção 4 dedica-se a apresentação da ferramenta.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

A M&V de economia de energia é geralmente guiada pelo Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) [1]. Contudo, não se limitam a ele, existem também alguns outros guias de M&V de economia de energia, como por exemplo [2-5], guias/protocolos orientativos que tratam do assunto, portanto o mais importante quando se trata da M&V é utilizar as melhores práticas internacionais e não se limitar a um documento em específico.

Conforme definido em (1), o consumo de linha de base é assumido como sendo a consumo de energia que teria ocorrido se AEE não tivesse sido implementada, de modo que o consumo de linha de base e o consumo real durante o período de pós-implementação estarão exatamente na mesma base, o mesmo ambiente, como temperatura, ocupação, produção etc. No entanto, o consumo da linha de base no período de determinação da economia nunca é medido, e sim calculado por meio de uma equação da linha de base, que por sua vez é construída com base nos dados do período pré-implementação da AEE. Outra opção fornecida em (1) é o cálculo da economia de energia normalizada, onde tanto PLB quanto PDE são colocados em uma mesma base normal, no caso de edificações é utilizado o Ano Meteorológico Típico – AMT.

Um elemento crucial na metodologia básica usada para determinar a economia de energia com AEEs a partir de dados monitorados continuamente envolve o desenvolvimento de um modelo para o uso de energia de linha de base ou pré-AEEs. As várias abordagens de modelo disponíveis e as vantagens e desvantagens de cada uma foram discutidas em vários artigos. O princípio para medir a economia de energia, de todos os guias/protocolos mencionados anteriormente, se baseia na modelagem de regressão (6-8). O método de regressão para medir a economia tem sido amplamente utilizado nos setores de construção residencial e comercial (9,10). Contudo, existem na literatura vários outros métodos para determinar a linha de base, em (11) é fornecido um bom resumo das diferentes modelagens da linha de base.

Aparentemente existe um gap na literatura pesquisada sobre a existência de ferramentas computacionais semelhantes à apresentada neste informe técnico. No exterior existem algumas utilizadas para a definição de *benchmarking*, dentre essas é válido citar “*Energy Star Do Portfolio Manager*”, e “*Excellence In Design For Greater Efficiencies*”. Talvez a ferramenta computacional que mais se aproxima da apresentada aqui seja a BizEE. Ela calcula o GDR/GDA para várias estações meteorológicas no mundo (18). Porém, não foi encontrado na literatura uma ferramenta que construa a linha de base de uma edificação específica, utilizando para isso dados climáticos da estação meteorológica mais próxima, dados da fatura de energia e aspectos operacionais da edificação.

3.0 ASPECTOS TÉCNICOS E CONCEITUAIS APLICADOS NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Nas subseções a seguir será descrito resumidamente os principais aspectos técnicos e conceituais necessários para o perfeito entendimento do princípio de funcionamento da ferramenta computacional desenvolvida.

3.1 Graus dias

O clima tem muitas dimensões, mas o principal fator para a demanda por aquecimento e resfriamento em edificações corporativas é a temperatura externa. O Método Graus Dia é uma ferramenta introduzida no final da década de 20 que tem a finalidade de estimar a quantidade de energia requerida para calefação e resfriamento de edificações (19). Baseia-se no princípio de que as perdas de energia da construção são proporcionais às diferenças de temperatura interna e externa. Em outras palavras, é um parâmetro climático que pode ser definido como sendo o somatório das diferenças de temperatura, quando esta se encontra abaixo ou acima de uma temperatura de referência (T_{ref}), a depender se está calculado o GDR ou GDA, respectivamente Graus Dia de Resfriamento e Aquecimento. Quando o resultado for um número negativo, não se deve somar, e a interpretação física é que neste caso não é necessário consumir energia para resfriar ou aquecer o ambiente. Assim, tem-se:

$$GDR = \sum T_{ref} - T_{méd} \quad \text{Equação (1)}$$

A energia requerida para refrigeração pode ser calculada de forma análoga, porém são consideradas as temperaturas que excedem a temperatura de referência.

$$GDA = \sum T_{méd} - T_{ref} \quad \text{Equação (2)}$$

3.2 Aspectos estatísticos

O critério mais utilizado para estabelecer limites estatísticos sólidos para avaliar a adequação do modelo de linha de base foi o proposto em (21). Os autores propuseram dois critérios: (1) que modelos com coeficiente de determinação, ou seja, valores de $R^2 > 0,7$ e coeficiente de variação $CV < 7\%$ ou (2) que modelos com baixos valores de R^2 e $CV < 12\%$, sejam considerados modelos confiáveis. Os modelos que não satisfazem pelo menos um desses critérios deve ser considerado fraco.

3.3 Dados climáticos

Dados climáticos diários estão disponíveis, a partir de estações de monitoramento locais e regionais, e disponíveis para *download* no site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (22). Porém, o registro do clima pode não estar disponível para alguns períodos, podendo ser necessário usar dados de estações vizinhas para inferir dados ausentes. Contudo, no âmbito deste trabalho, os dados ausentes foram complementados pelo respectivo valor apresentado no Ano Meteorológico Típico (AMT).

3.4 Ano Meteorológico Típico

O Ano Meteorológico Típico (AMT) é formado por meio de uma metodologia baseada na eliminação de anos cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas) até que se obtenha apenas um ano de dados médios (23). O AMT é então uma série de dados climáticos tratados segundo uma metodologia e representa uma situação referencial do clima do local em questão (24).

3.5 Medição de energia pela concessionária

A grande vantagem de trabalhar com toda a instalação é a possibilidade de empregar a Opção C do PIMVP, uma vez que reduz significativamente os custos de medição tendo em vista a utilização dos dados de consumo de energia mensal realizados pela concessionária de energia local. Contudo, torna-se de fundamental importância avaliar os seguintes pontos: (i) as leituras estimadas introduzem erros no modelo de linha de base e, se identificado, não deve ser usado; (ii) a leitura de energia da concessionária, na maioria das vezes não se refere ao mês calendário; (iii) ademais, deve-se atentar para os dados relativos ao mês de janeiro, uma vez que o mesmo pode se referir, pelo menos em parte, ao mês de dezembro do ano anterior.

3.6 Ocupação

A taxa de ocupação é um dado importante para o refinamento do modelo, especialmente devido ao isolamento social imposto pela pandemia do SARS-COV-2, onde muitas edificações corporativas, em 2020, tiveram a sua taxa de ocupação reduzida significativamente. Posteriormente, com a possível adoção do modelo de trabalho híbrido (casa/escritório), será imprescindível que o modelo da linha de base seja sensível a essa variável. Caso contrário, a análise não seria realizada em uma mesma base.

Os dados de ocupação podem ser obtidos no setor de recursos humanos da organização. Contudo, muitas das vezes é necessário fazer o tratamento deles de modo a se utilizar a informação que melhor reflita o impacto da taxa de ocupação no consumo de energia da edificação. Como mencionado anteriormente, deve-se ter o cuidado de calcular a taxa de ocupação para o mesmo período de leitura de energia da concessionária.

3.7 Outliers

Por definição, *outlier* pode ser definido como sendo os dados que se distanciam radicalmente dos demais ("pontos fora da curva"). Para efeito da ferramenta computacional desenvolvida, a mesma exclui do modelo os *outliers* e para tanto adota-se como referência dois desvios padrões.

3.8 Finais de semana e feriados

A ferramenta computacional desenvolvida exclui automaticamente os dados climáticos (GDR e GDA) dos finais de semana e feriados nacionais. Naturalmente, dependendo do local onde a edificação estiver construída, é necessário adicionar os feriados regionais e também alterar o padrão de operação nos finais de semana.

4.0 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Para construir um modelo de linha de base, a primeira tarefa é estabelecer a relação funcional entre o consumo de energia da edificação e as variáveis exógenas observáveis. Climatização e a ocupação são normalmente as variáveis independentes, que conseguem explicar satisfatoriamente bem o consumo de energia da edificação. Ademais, programas de melhoria da eficiência energética tendem a ser empregadas em toda a instalação, o que requer um nível de detalhe específico para os padrões gerais de uso de energia e dados de medição. O argumento é que, para a maioria das edificações, deveria ser possível estabelecer a forma como o condomínio consome energia de uma forma confiável e estatisticamente significativa. O profissional de M&V deve, no entanto, estar preparado para flexibilizar isto em alguns casos, por causa de fatores não observáveis e/ou condições além da capacidade do modelo.

A equação da linha de base pode ser escrita em função de diversas variáveis independentes:

$$y = f(GDR, GDA, T.O., \dots)$$

Equação (3)

onde y , refere-se ao consumo de eletricidade.

O conjunto de fatores e a forma funcional irão variar dependendo das características da edificação. A relação entre o consumo de eletricidade e as variáveis independentes é considerado linear:

$$y = \alpha_1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$$

Equação (4)

onde α_1 é o consumo base, α_i é o coeficiente da variável independente x_i e n é o quantitativo de variáveis independentes adotadas para construção do modelo da linha de base. Os coeficientes são calculados empregando o método dos mínimos quadrados ordinários, com base no consumo de energia e nas variáveis independentes. Na forma expandida, a equação de consumo da linha de base é escrita como:

$$y = \alpha_1 + \alpha_{GDR} GDR + \alpha_{GDA} GDA + \alpha_{T.O.} T.O.$$

Equação (5)

Naturalmente, nem todas as variáveis serão necessárias para cada edificação e a seleção é, em última análise, baseada nas características dos parâmetros de ajuste do modelo e preferência do usuário. A ferramenta computacional desenvolvida permite a adoção da combinação linear dessas três variáveis.

Quanto aos dados históricos necessários para a construção do modelo, geralmente é necessário no mínimo 12 meses de dados de faturamento, do período de linha de base, sejam processados, para estimar a relação funcional entre o consumo de energia e as variáveis independentes.

O modelo de linha de base é usado para prever os valores da variável dependente (consumo de energia), em função dos dados dos valores das variáveis independentes que foram observadas (GDR, GDA e T.O.). Inferências com base nas estimativas de mínimos quadrados levam a intervalos de confiança para os coeficientes de regressão e para as estimativas previstas pelo modelo de valores de consumo de energia futuros.

4.1 Cálculo da economia de energia

Usando o modelo de linha de base parametrizado, consegue-se prever o quanto de energia a edificação teria consumido se não tivessem sido implementadas as ações de eficiência energética previstas. Naturalmente, deve-se utilizar os valores das variáveis independentes depois que a melhoria de energia ocorreu e finalmente comparar com o consumo de energia que de fato aconteceu. Conforme mencionado anteriormente este método é denominado "Método da Economia de Energia Evitado". Matematicamente tem-se:

$$Economia = y_{modelo} - y_{atual}$$

Equação (6)

Naturalmente, se o valor for positivo significa que houve economia de energia e do contrário não. Deve-se aqui mais uma vez ressaltar a importância da construção de uma linha de base, uma vez que o consumo de energia pode, inclusive, aumentar e mesmo assim obter economia de energia.

Para o método da "Economia de energia normalizado" utiliza-se os coeficientes das equações de regressão, tanto do período da linha de base quanto do de determinação da economia, porém com os valores das variáveis independentes para o ano típico, incluindo tanto as variáveis climáticas (GDR e GDA) quanto a ocupação típica da edificação em um ano de referência.

5.0 APRESENTAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional foi desenvolvida em ambiente Google Sheets pela comodidade de se trabalhar online, mas poderia ter sido empregada também outros *softwares* de planilhas eletrônicas compartilhadas ou não na nuvem.

A metodologia geral empregada na ferramenta, para construir um modelo de linha de base de energia e avaliar a economia de energia, teve como diretrizes principais o PIMVP, mas não se limitou ao mesmo.

5.1 Apresentação das principais telas

Passa-se agora a ser apresentada as principais telas da ferramenta. A primeira delas é autoexplicativa e refere-se às informações iniciais, conforme apresentado na Figura 1.

Temperatura de referência[C]	22
Selecione abaixo a(s) sua(s) variáveis independentes:	
GDR	<input checked="" type="checkbox"/>
GDA	<input type="checkbox"/>
Ocupação	<input checked="" type="checkbox"/>
Tarifa [R\$/kWh]	R\$ 0,90
Horário de ligar o Sistema de Ar Condicionado	6
Horário de desligar o Sistema de Ar Condicionado	18
Ano bissexto	<input checked="" type="checkbox"/>
Ano do Período da Linha de Base (PLB)	2019
Ano do Período de Determinação da Economia (PDE)	2021

FIGURA 1 - Informações iniciais

A segunda tela é apresentada na Figura 2 e refere-se às informações do PLB. Nela são incluídos os dias de leitura de energia pela concessionária no mês corrente, a taxa de ocupação do referido período e o consumo de energia elétrica, também obtido na fatura. A ferramenta calcula automaticamente o GDR e/ou GDA entre o dia de leitura do mês anterior e o mês atual, desta forma é imprescindível que a taxa de ocupação se refira exatamente a este período. Do contrário, resultará em erros adicionais quando da modelagem da linha de base. A tela referente às informações do PDE é idêntica a esta, portanto visando evitar repetições desnecessárias, optou-se pela sua não inserção neste informe técnico.

PERÍODO DA LINHA DE BASE - PLB											
Referência	Mês	Dias de consumo	Dia de leitura de energia do mês anterior	Dia de leitura de energia do mês atual	GDR mês atual	GDR mês anterior	GDR PLB	GDA período de medição	Ocupação	Consumo PLB [kWh]	Consumo PLB normalizado [kWh]
1	JANEIRO	31	1	1	0	83,15	83,15	0			335147,5539
2	FEVEREIRO	31	1	1	4,35	87,4	91,75	0			359567,8584
3	MARÇO	29	1	1	4,55	82,6	87,15	0			358579,1913
4	ABRIL	31	1	1	3,4	83,5	86,9	0	17580	415968	343626,2058
5	MAIO	30	1	1	0	81,75	81,75	0	19432	428439	342400,3783
6	JUNHO	31	1	1	0	76,1	76,1	0	14479	364302	339982,4248
7	JULHO	30	1	1	2,8	40,75	43,55	0	16739	395550	326801,5638
8	AGOSTO	31	1	1	2,05	33,9	35,95	0	19029	394939	317503,645
9	SETEMBRO	31	1	1	0	26,7	26,7	0	17563	375713	324043,6306
10	OUTUBRO	30	1	1	2,65	48,5	51,15	0	19514	418016	337020,1751
11	NOVEMBRO	31	1	1	2,5	66,35	68,85	0	18372	402790	353198,4164
12	DEZEMBRO	30	1	1	0	80,55	80,55	0	14493	416900	347033,541
Soma										3612557	4084904,585
Média										401395,2222	340408,7154
Desvio Padrão - DP										19926,23867	12701,63788
Coeficiente de variância - CV										4,96%	3,73%

FIGURA 2 - Informações referentes ao PLB

A Figura 3 apresenta a imagem referente aos dados climáticos do PLB, que deve ser alimentada com as datas e as medições de temperatura apresentadas em (22). Assim a ferramenta internamente calcula dia a dia o GDR/GDA e soma os mesmo de acordo com o período de leitura da concessionária apresentado na Figura 2. Observa-se ainda que os dados disponíveis são horários para os 365 dias do ano, porém devido a algum problema de medição em (22) podem faltar dados. Quando isto acontece, a ferramenta automaticamente o substitui pelo dado disponível para o AMT, no mesmo dia e hora, desta forma torna-se necessário também preencher os dados referentes ao AMT. A ferramenta automaticamente expurga dos cálculos os finais de semana e feriados cadastrados na planilha específica para este fim.

PLANILHA AUXILIAR REFERENTE AO PLB										
ITEM	DIA DO ANO	DATA	Dia da Semana	FERIADOS	FDS	MÊS	DIA	HORA	Temperatura	
5532	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	12	23
5533	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	13	26
5534	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	14	27,4
5535	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	15	
5536	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	16	30
5537	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	17	30,7
5538	231	19/08/2021	quinta-feira	NÃO	NÃO		8	19	18	30,9

FIGURA 3 - Dados climáticos do PLB

Dada a semelhança, e novamente para evitar repetições desnecessárias, optou-se por não apresentar aqui as Figuras referentes a Planilha auxiliar do PDE e a planilha referente ao AMT.

Para o cálculo da economia de energia pelo método normalizado é necessário estabelecer a ocupação normal e calcular o GDR/GDA normal, e isto é realizado na planilha "GD-Normal" tendo como base os dados disponíveis para o AMT. A Figura 4 apresenta a tela para o cálculo do GDR que é semelhante a do GDA. Observa-se que, naturalmente, o período entre datas deve ser o mesmo das faturas de energia elétrica da concessionária.

Referência	Mês	Dia de leitura de energia do mês anterior	Dia de leitura de energia do mês atual	GDR período de medição	Ocupação Normal
1	JANEIRO	17	16	117,65	94%
2	FEVEREIRO	16	13	95,35	100%
3	MARÇO	13	15	100,65	73%
4	ABRIL	15	13	88,55	39%
5	MAIO	13	15	35,4	47%
6	JUNHO	15	14	2,4	53%
7	JULHO	14	15	2,6	49%
8	AGOSTO	15	15	10,05	52%
9	SETEMBRO	15	16	27,65	72%
10	OUTUBRO	16	16	27,9	77%
11	NOVEMBRO	16	16	57,5	87%
12	DEZEMBRO	16	17	109,9	80%

FIGURA 4 - GDR normal

Na planilha de "Análise estatística" a ferramenta trata os dados para obter a linha de base. Inicialmente ela desconsidera os *outliers* para na sequência proceder a modelagem da equação da linha de base. A Figura 5 apresenta a tela na qual é apresentado o resultado da análise estatística. Observa-se que a depender da quantidade de variáveis independentes selecionadas na Figura 1, a ferramenta automaticamente amplia ou reduz a quantidade de coeficientes da equação, identificando-os.

Muitas das vezes a validação da equação da linha de base é feita tendo como referência apenas o valor de R^2 , contudo como foi visto é necessário fazer uma análise mais abrangente. Uma dessas análises é a interpretação física dos coeficientes, por exemplo, eles não podem ser negativos uma vez que aumentar GDR ou ocupação aumenta automaticamente o consumo de energia e também é fisicamente incoerente ter uma carga base negativa. Além de apresentar os coeficientes, é feita uma análise estatística do Erro Padrão (EP), tanto dos coeficientes quando da variável y , consumo de energia. Observa-se para a variável "ocupação" um elevado valor relativo, contudo o valor de $CV < 7\%$ e o valor de $R^2 > 0,75$, o que atende aos critérios estatísticos da bibliografia pesquisada para a validação do modelo.

A estatística t é usada para calcular a precisão para um nível de confiança especificado usando tabelas de pesquisa. Ela também é usada para testar a significância estatística de variáveis independentes que fazem parte de um modelo de regressão na estimativa da variável dependente. A análise da literatura indica como recomendável que o valor da estatística t seja superior a 2.

A incerteza inerente é calculada e avaliada em relação a quaisquer limites mínimos internos ou externos de precisão e confiança, sendo assim, o erro padrão do exemplo em tela será $\pm 4342 \text{ kWh}$. A ferramenta também apresenta o valor da precisão absoluta, que é a medida do intervalo absoluto dentro do qual se espera que ocorra o valor verdadeiro para um determinado nível de confiança.

Quando um modelo é usado para prever um valor de energia (y) para determinadas variáveis independentes, a precisão da previsão é medida pelo erro padrão da estimativa (EP_Y). Essa medida de precisão é fornecida pela ferramenta e o erro padrão da estimativa é dado por:

$$EP_Y = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n - p - 1}} \quad \text{Equação (8)}$$

onde p é o número de variáveis independentes no modelo de regressão e n é o tamanho da amostra. Uma vez que os valores das variáveis independentes são inseridos no modelo para estimar um valor de energia (y), uma aproximação da faixa de valores possíveis, com um determinado nível de confiança, pode ser obtido conforme equação abaixo:

$$\text{Range} = \hat{y} \pm t EP_Y \quad \text{Equação (9)}$$

onde \hat{y} é a estimativa, valor obtido pela equação da linha de base, para uma determinada taxa de ocupação e GDR; t é o valor tabelado para a estatística t em um determinado nível de confiança.

Estatística t	1,274714319	5,729169775	5,686285486
	Ocupação	GDR	
Coeficientes da equação da Linha de Base do tipo: $y=ax+b*x+c$			
	2,197051434	418,8543515	129189,3073
Erro padrão (EP) dos coeficientes a e b e da constante c			
	1,723563783	73,10908351	22719,45501
R ² e EP para y	0,856196617	4854,031569	#N/D
Estatística F e GL			
	23,8157573	8	#N/D
Soma dos quadrados da regressão e soma residual			
	1122275765	188492979,8	#N/D
CV	0,001%	0,04%	
R2	0,856196617		
EP	4341,577821		
t	2,31		
Precisão	10029,04477		

FIGURA 5 - Análise estatística

Após a validação da modelagem da linha de base, por meio dos critérios sucintamente aqui descritos, implementação das ações de eficiência energética e alimentação da ferramenta com os dados do PDE, a ferramenta apresenta os resultados da economia de energia por ambos os métodos, economia evitada e normalizada. Naturalmente, os valores são diferentes, mas ambas as metodologias de cálculos são válidas, por isto o mais importante é combinar previamente qual delas será utilizada. A Figura 6 apresenta o formato do quadro resumo com as economias de energia obtidas.

ECONOMIA DE ENERGIA						
Mês	Consumo de energia evitado [kWh]	Economia normalizada [kWh]	Consumo de energia evitado [R\$]	Economia normalizada [R\$]	Consumo de energia evitado [%]	Economia normalizada [%]
JANEIRO	3909,978071	47424,03907	R\$ 3.518,98	R\$ 42.681,64	2,03%	23,75%
FEVEREIRO	43624,73082	42856,99877	R\$ 39.262,26	R\$ 38.571,30	22,34%	21,99%
MARÇO	69403,51759	43482,45907	R\$ 62.463,17	R\$ 39.134,21	37,27%	22,23%
ABRIL	78857,41058	40402,36212	R\$ 70.971,67	R\$ 36.362,13	42,32%	21,00%
MAIO	53172,84458	27692,53681	R\$ 47.855,56	R\$ 24.923,28	29,87%	15,46%
JUNHO	41847,39293	19325,53017	R\$ 37.662,65	R\$ 17.392,98	23,71%	11,34%
JULHO	24254,56044	19148,5131	R\$ 21.829,10	R\$ 17.233,66	13,51%	11,25%
AGOSTO	12668,18555	21131,10424	R\$ 11.401,37	R\$ 19.017,99	7,19%	12,26%
SETEMBRO	-321,5465717	25816,15591	-R\$ 289,39	R\$ 23.234,54	-0,18%	14,57%
OUTUBRO	16095,14271	26217,39459	R\$ 14.485,63	R\$ 23.595,66	8,80%	14,76%
NOVEMBRO	-44,96648602	33911,73638	-R\$ 40,47	R\$ 30.520,56	-0,03%	18,27%
DEZEMBRO	181957,7095	46692,36853	R\$ 163.761,94	R\$ 42.023,13	100,00%	23,47%
TOTAL	525424,9597	394101,1987	R\$ 472.882,46	R\$ 354.691,08	23,96%	17,80%

FIGURA 6 - Quadro resumo da economia de energia

6.0 CONCLUSÕES

A ferramenta computacional apresentada neste informe técnico foi desenvolvida para atender à demanda solicitada em fevereiro de 2020 ao Comitê Integrado de Eficiência Energética do Sistema Eletrobras (CIEESE), referente às iniciativas de eficiência das empresas Eletrobras aplicadas às edificações corporativas das empresas do grupo. Para tanto, ela deveria utilizar o máximo de informações disponíveis sem a necessidade de custos adicionais.

A utilização de uma Linha de Base é que permite, por meio da definição de uma equação com pelo menos uma variável independente, comprovar os efeitos reais provenientes das ações de eficiência energética implementadas, não sendo mascaradas por situações circunstanciais, como períodos de clima/temperatura mais quentes ou amenas, variação do número de usuários seja por desligamento ou, como tem ocorrido em 2020, por necessidade de isolamento social, sendo o trabalho realizado por grande parte dos funcionários de forma remota.

Com uma Linha de Base bem elaborada e validada por meio de critérios estatísticos, tendo como, por exemplo, variável independente GDR e T.O., verifica-se que os ganhos em eficiência energética por ações implementadas em sistemas de condicionamento de ar teriam sido relevantes, mesmo quando as temperaturas no ano observado tenham sido superiores às do ano de referência. Ou mesmo comprovar, como é comum ocorrer, que se houve algum aumento no consumo, este aumento poderia ter sido ainda maior, caso não tivessem sido realizadas AEEs na edificação.

Finalmente, por meio do desenvolvimento da equação da Linha de Base pode-se ter uma previsão do consumo de energia, caso AEEs não tivessem sido tomadas, para ser comparada com o consumo real de energia, considerando variações na temperatura e/ou o número de usuários real da edificação, após a implementação das AEEs.

A partir destas premissas e considerações, visando o cálculo adequado do indicador para Energia Economizada em Edificações Corporativas das Empresas Eletrobras, foi desenvolvida esta ferramenta computacional apresentada neste documento. A mesma foi desenvolvida para um caso geral onde o sistema de climatização é significativo frente às demais cargas da edificação, o que teoricamente implica em dizer que o consumo de energia tem uma boa correlação com o GDR. Para o cálculo do mesmo utilizou-se dados climáticos do INMET para a estação meteorológica mais próxima. Contudo, existem *gaps* de medições que por sua vez foram complementados com dados do ano meteorológico típico.

A segunda variável independente utilizada foi a taxa de ocupação da edificação que além de melhorar a modelagem da linha de base, permite também analisar futuramente o consumo de energia das edificações com taxas parciais de ocupação em virtude do possível trabalho híbrido (casa/escritório) a ser implementado após a pandemia imposta pelo SARS-COV 2. Verificou-se também ser de fundamental importância tanto a obtenção deste dado real (obtido junto ao RH das empresas) e o alinhamento temporal dessa taxa de ocupação com os períodos de medição de energia e da variável climática.

Deve-se destacar novamente que a ferramenta computacional foi desenvolvida utilizando uma metodologia já existente. Isto posto, e tendo em vista a premissa inicial estabelecida, que era: desenvolver uma ferramenta computacional para calcular a economia de energia com as AEEs implementadas pelas empresas do sistema Eletrobras nas edificações corporativas, que fosse amigável e que não onerasse o projeto. Como a mesma utiliza apenas dados das faturas de energia, aspectos operacionais da edificação (basicamente tarifa de energia, *set point* do ar condicionado e horário de ligar/desligar o sistema), dados climáticos disponíveis e foi desenvolvida em um ambiente computacional amigável e amplamente difundido, entende-se que a mesma atendeu a premissa inicial estabelecida.

Pretende-se futuramente disponibilizar a ferramenta em ambiente web de modo a automatizar a questão dos dados climáticos. Pretende-se que a mesma solicite apenas o local onde a edificação está situada e os anos dos PLB e do PDE e ela automaticamente busque no banco de dados do INMET ou no ano meteorológico típico os dados climáticos e calcule automaticamente o GDR. Assim, bastará ao usuário informar a tarifa de energia, horário de ligar e desligar o sistema de climatização, *setpoint*, datas de leitura, valores de consumo de energia e taxa de ocupação. Deste modo automatizando ainda mais o processo e permitindo o seu uso em maior escala.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MILANEZ, Fernando de Castro Santos; DE SOUZA, Maria Helena Mendonça; MESQUITA, Adriana. Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance.
- (2) (2002) Department of Energy (USA). M&V guidelines: measurement and verification for federal energy projects. Version 2.2
(2002)
- (3) American society of heating, refrigeration and air conditioning engineers. Measurement of energy and demand savings, guideline 14-2002. Atlanta: ASHRAE
- (4)(2006) ESKOM, The measurement and verification guideline for demand-side management projects. Version 5
- (5) (2004) Australian energy performance contracting association. A best practice guide to measurement and verification of energy savings. Commonwealth of Australia
- (6)Kissock, J. K., Reddy, T. A., and Claridge, D. E., 1998, ASME JSEE, Special Issue.
- (7)Katipamula, S., Reddy, T. A., and Claridge, D. E., 1998, ASME JSEE, Special Issue.
- (8) Dhar, A., Reddy, T. A., and Claridge, D. E., 1998, ASME JSEE Special Issue.
- (9) Ruch, D. K., Kissock, J. K., and Reddy, T. A., 1993a, "Model Identification and Prediction Uncertainty of Linear Building Energy Use Models with Autocorrelated Residuals," Proceedings of the ASME-SED Conference, Washington, DC, Apr.
- (10) Katipamula, S., Reddy, A., and Claridge, D., 1994, 'Development and Application of Regression Models to Predict Cooling Energy Consumption in Large Commercial Buildings,' ASME/JSES/KSES International Solar Energy Conference, Hawaii, Mar.

- (11) MATHIEU, Johanna L.; CALLAWAY, Duncan S.; KILICCOTE, Sila. Variability in automated responses of commercial buildings and industrial facilities to dynamic electricity prices. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 12, p. 3322-3330, 2011.
- (18) UNDERGROUND, Weather. BiZEE-Degree Days. Retrieved, v. 6, n. 01, p. 2011, 2010.
- (19) SAID, S. A. M.; HABIB, M. A.; IQBAL, M. O. Database for building prediction in Saudi Arabia. *Energy Conversion & Management*, n. 44, p. 191 – 201, 2003.
- (20) GOULART, S. V. G. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- (21) Reynolds, C., and M. Fels. 1988. Reliability Criteria for Weather Adjustment of Energy Billing Data. Pro-ceedings of the 1988 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, pp. 10.236-51.
- (22) BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS, INMET 2021. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 08 de setembro de 2021.
- (23) GOULART, S., LAMBERTS, R., FIRMINO, S. Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras. Florianópolis: UFSC, 1997. 345 p.
- (24) CARLO, J.; LAMBERTS, R. Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações. ARQUIVOS Climáticos. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2005.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em engenharia industrial mecânica pelo CEFET-MG, pós-graduado em Engenharia de Manutenção pela PUC-MG, CMVP, mestre e doutor em ciências térmicas pela UFF-RJ e atualmente é pós-doutorando nessa mesma universidade. Estagiou na Efficientia; trabalhou na ALL; foi responsável técnico da Servitec e é funcionário da Eletrobras desde então, onde atua na elaboração de políticas públicas para eficiência energética direcionadas ao setor industrial. Adicionalmente, ministra aulas em pós-graduações *latu sensu* relacionadas a temática da eficiência energética. Na UFF é professor convidado do curso do LATEC-UFF, pela UCP-IPETEC ministra aulas em diversas pós-graduações e também ministra cursos de capacitação técnica pelo SENGE-RJ.

(2) LUCIANA DIAS LAGO MACHADO

CURRÍCULO RESUMIDO LUCIANA DIAS LAGO MACHADO Engenheira Civil da Eletrobras, atuando há 16 anos no Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, com enfoque em EE em Saneamento, Edificações e Prédios Públicos, tendo atuado, ainda, por 2 anos como Gerente de Bens da União. Graduada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Engenharia Civil - COPPE-UFRJ. Pós-graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola Politécnica – UFRJ. Diversos artigos sobre Eficiência Energética publicados em Fóruns Nacionais e Internacionais. Ampla experiência profissional, com interação em diversas esferas de governo. Elevada prática no desenvolvimento de algoritmos e desenvolvimento de procedimentos computacionais.

(3) ESTEFÂNIA NEIVA DE MELLO

Possui graduação (2003) e mestrado (2006) em Arquitetura e Urbanismo, ambos pela Universidade Federal Fluminense. Desde 2008 é arquiteta das Eletrobras, atuando diretamente no Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Atualmente é coordenadora do GT Edificações - Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações do País - cuja missão é prestar assessoria técnica ao Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética (MME) na condução da Política Nacional de Eficiência Energética. Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em Adequação Ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, conforto ambiental, etiquetagem de edificações, políticas públicas e regulação.