

Simulação Computacional no Processo de M&V: Um Estudo de Caso da Universidade de Brasília.

João P. A. Honorato*. Loana N. Velasco**.
Alex Reis***. Junio A. de Matos****. Elias Barbosa *****.

*Universidade de Brasília, Brasília, Brasil (Tel: +55 (61) 981943441; e-mail: joao.alemonge@gmail.com)

** Universidade de Brasília, Brasília, Brasil (e-mail: loana.velasco@gmail.com)

*** Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, (e-mail: reialex@gmail.com)

**** Companhia Elétrica de Brasília - CEB, Brasília, Brasil (e-mail: junio.matos@ceb.com.br)

***** Companhia Elétrica de Brasília - CEB, Brasília, Brasil, (e-mail: elias.barbosa@ceb.com.br)

Abstract: In order to increase the reliability of energy efficiency actions and demonstrate in a quantitative way its economic and environmental gains, the Measurement and Verification (M&V) process was developed, which consists of methodologies to calculate the energy saved in this type of project. There are several methods for applying M&V, all described in the International Performance Measurement and Verification Protocol (PIMVP), such methods can be divided into physical ones, in which an energy analyzer is used to obtain the consumption data of the system or installation, or computational, in which the installation is simulated to obtain consumption. However, the most common are physical methods, in addition, it was observed that there are few published studies addressing the application of computer simulation to calculate the energy savings of this type of project. In this way, the present work aims to demonstrate the use of calibrated computational simulation to obtain the gains from the energy efficiency actions carried out at the Faculdade de Tecnologia of the Universidade de Brasília under the Energy Efficiency Program of CEB-D. For this simulation was created model rooms that were simulated and served to develop the program calibration which can be expanded allowing the global simulation of the building. Finally, the results of the simulation were compared to results obtained theoretically.

Keywords: Energy Efficiency; Computational simulation; Designer Builder; Energy Efficiency Program; Measurement and Verification; Energy Savings; Environmental Conditioning.

Resumo: Visando aumentar a confiabilidade das ações de eficiência energética e demonstrar de forma quantitativa seus ganhos econômicos e ambientais foi desenvolvido o processo de Medição e Verificação (M&V) que consiste em metodologias para calcular a energia economizada neste tipo de projeto. Há diversos métodos para aplicação do M&V todos descritos no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), tais métodos podem ser divididos em físicos, nos quais utiliza-se um analisador de energia para obter os dados de consumo do sistema ou instalação, ou computacionais, nos quais a instalação é simulada para obtenção do consumo. Contudo os mais comuns são os métodos físicos, além disso, observou-se que existem poucos estudos divulgados abordando a aplicação da simulação computacional para calcular a economia de energia deste tipo de projeto. Deste modo, o presente trabalho visa demonstrar a utilização da simulação computacional calibrada para obtenção dos ganhos das ações de eficiência energética realizadas na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília no âmbito do Programa de Eficiência Energética da CEB – D, para tal foram escolhidos ambientes modelos que foram simulados e serviram para desenvolver a calibração do programa que em seguida pode ser expandida permitindo a simulação do edifício como um todo. Por fim, os resultados da simulação foram comparados a resultados obtidos teoricamente.

Palavras-chaves: Eficiência Energética; Simulação Computacional; Designer Builder; Programa de Eficiência Energética (PEE); Medição e Verificação; Economia de Energia; Condicionamento Ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética é definida como a capacidade de realizar a mesma tarefa utilizando menos energia e é composta por um conjunto de medidas como, por exemplo, trocas de equipamentos por modelos mais eficientes, programas de etiquetagem e medidas de conscientização sobre o tema. (US National Policy Development Group, 2001). Segundo estudos

apresentados pela Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Conservação de Energia (ABESCO) apontam que a fonte mais barata de energia atualmente é a eficiência energética. (ABESCO, 2018).

Contudo a economia de energia promovida por estas ações não pode ser medida de forma direta por se tratar de uma energia que nunca foi utilizada. Além disso, os reais benefícios do projeto podem ser encobertos devido a alterações no padrão de

uso do sistema ou pela adição de novas cargas. Dessa forma, para constatar se a economia de energia é ou não obtida por uma ação de eficiência energética é preciso medir os resultados relacionados com a redução do consumo de energia no sistema em questão e os ganhos associados. (EVO, 2019).

Assim, de modo a padronizar o processo de Medição e Verificação (M&V) dos resultados obtidos o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) liderou os esforços para estabelecer um padrão internacional que permitisse determinar os ganhos destes projetos e conferisse credibilidade as ações. Em 1997 foi criada a primeira versão do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) que estabeleceu os requisitos para medir os efeitos da eficiência energética. (INEE, 2019). O PIMVP apresenta quatro métodos de M&V nomeando os de A até D. Os três primeiros métodos são físicos e consistem na realização da medição do consumo de energia do sistema de interesse antes e depois do projeto por meio de medidores instalados na edificação. Já o Método D consiste na simulação computacional calibrada do sistema antes e após o projeto visando calcular seu consumo de energia.

Seguindo a tendência mundial de criação de políticas públicas de eficiência energética, o Brasil criou em 2001 a lei n. 10.295/2001 conhecida como lei da eficiência energética na qual as concessionárias e distribuidoras de energia passaram a investir parte do seu faturamento em projetos de eficiência energética. (BRASIL, 2001). Estes projetos exigem a realização de um processo de Medição e verificação para calcular os ganhos das AEEs abordadas que em geral é realizado por métodos físicos. Assim, visando desenvolver o conhecimento acerca do método de simulação computacional na área de M&V, o presente trabalho abordará a utilização de simulações calibradas para calcular a economia de energia obtida com o projeto de eficiência energética realizada na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília no âmbito do programa de eficiência energética da CEB – D.

Este edifício foi inaugurado em 1964 e nestes anos passou por adaptações de seu espaço físico e nos sistemas elétricos para abrigar novos cursos e possibilitar a expansão do número de estudantes. Contudo, essas adaptações não seguiram um plano diretor sendo realizadas por departamentos específicos e visando sanar seus problemas locais o que resultou em um sistema orgânico e pouco eficiente do ponto de vista energético. Desta forma, o projeto consistiu no retrofit do sistema de iluminação e do sistema de condicionamento ambiental do edifício visando melhor sua eficiência e padroniza-lo.

2. DESENVOLVIMENTO

O projeto consistiu na substituição de 2970 lâmpadas fluorescentes tubulares por lâmpadas de LED tubular equivalentes e com selo PROCEL, além disso, foi realizado o retrofit do sistema de condicionamento ambiental substituído 144 aparelhos de ar condicionado por modelos mais eficientes e que apresentassem selo PROCEL.

As lâmpadas fluorescentes substituídas foram de dois modelos distintos sendo um de 32W e um de 20W, porém a maioria das lâmpadas eram do primeiro modelo. Tais equipamentos foram substituídos por modelos LED de 18W e 9W respectivamente. Assim, a economia de energia do projeto advém da redução da potência da lâmpada e da remoção do reator já que as lâmpadas de LED não o possuem.

Os equipamentos de ar condicionado foram substituídos por modelos equivalentes que apresentam maior coeficiente de performance (COP), ou seja, utilizam menos energia para gerar a mesma capacidade de resfriamento. Deste modo a economia de energia advém do aumento da eficiência dos ares.

Para realizar o processo de medição e verificação optou-se por realizar o método D que consiste na simulação calibrada dos ambientes em estudo. Esse método permite a simulação do sistema antes e após a realização do projeto sob as mesmas condições resultando de forma direta na economia de energia obtida. Além disso, a edificação não apresentava um medidor de energia próprio no período de linha de base de modo que não havia dados medidos disponíveis sobre o sistema antigo o que incentivou a aplicação deste método.

2.1 Metodologia de Calibração

O processo de calibração dos modelos computacionais iniciou-se com a realização de visitas técnicas ao local. Nestas visitas levantou-se os dados de placa dos equipamentos de iluminação e de condicionamento ambiental de modo a obter os dados de entrada necessários ao programa. No caso do sistema de iluminação foram coletadas a potência da lâmpada e do reator e no caso do sistema de condicionamento ambiental foi coletado o coeficiente de performance (COP) e a capacidade de resfriamento dos aparelhos.

Na sequência realizou-se o levantamento das características físicas da edificação. Como as simulações baseiam-se na construção de um modelo tridimensional do edifício, é necessário determinar suas dimensões e os materiais que os compõem. Estes parâmetros influenciam diretamente a carga térmica do edifício e consequentemente o consumo de energia do sistema de condicionamento.

Por fim, determinou-se a ocupação de cada ambiente, seu horário e modo de funcionamento criando um perfil de uso de cada equipamento. Vale ressaltar que a ocupação dos ambientes foi determinada a partir do cronograma de uso disponibilizado na secretária de cada departamento e considera a variação de ocupação do prédio durante o semestre letivo. Também foram mapeados os demais equipamentos e carga térmicas que influenciam no consumo do sistema de condicionamento.

Todos estes dados foram utilizados como entradas no software Designer Builder para criar o modelo computacional da edificação e calibrá-lo para que refletisse o perfil de consumo da edificação. Visando torna-lo robusto decidiu-se começar as simulações a partir de ambientes pontuais que representassem a maioria dos ambientes, esses foram caracterizados e tiveram suas características detalhadamente levantadas. Na sequência, utilizou-se a calibração e a metodologia desenvolvida para expandir o modelo para o edifício como um todo.

Para avaliar os resultados obtidos e possuir um parâmetro de comparação, foram realizados os cálculos teóricos de consumo de energia de cada ambiente. Não foi possível comparar o resultado das simulações com medições realizadas no local, pois não havia medidor de energia no local durante a confecção do estudo, porém para trabalhos futuros pretende-se refinar o modelo e compará-lo com o resultado de medições locais. Deste modo, os cálculos teóricos de consumo de energia seguiram a seguinte equação:

$$EC = n.P.H.D.FUC.FUT \quad (1)$$

Na qual *EC* consiste na energia consumida, *n* o número de equipamentos, *P* a potência do equipamento, *H* o número de horas de funcionamento diário, *D* o número de dias de utilização por ano, *FUC* o fator de funcionamento do compressor e *FUT* o fator de utilização em função do clima.

O fator de funcionamento do compressor foi definido a partir de revisão bibliográfica em artigos que apresentam testes de funcionamento de aparelhos de ar condicionado. Nos artigos “Estudo do Potencial de Conservação de Energia Através do Controle do Carregamento de Geladeira e Ar Condicionado” escrito por Santana e Cruz em 2016 e “Nota técnica EPE 030/2018. Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética” publicado pela EPE em 2018 foram estimados os tempos de funcionamento do compressor de ares condicionados obtendo valores de 70 a 80% do tempo de funcionamento do aparelho. Como este valor varia dependendo do ambiente, decidiu-se utilizar o valor médio de 75% de funcionamento neste trabalho.

O fator de funcionamento do ar em função do clima foi definido a partir da análise do arquivo climático do aeroporto de Brasília. Inicialmente simulou-se a edificação sem os ares condicionados de modo a se obter a temperatura interna dos ambientes em função do tempo. Em seguida calculou-se a porcentagem do tempo no qual a temperatura do ambiente era superior ao *setpoint* do ar de modo a calcular quando ele seria acionado ou não pelo usuário.

Vale ressaltar que no caso do sistema de iluminação não há compressor ou *setpoint* de temperatura de modo que estes fatores são desconsiderados e assumem valor unitária na equação 1.

Como os dados de entrada na simulação foram os dados de placa obtido dos equipamentos, ou seja, iguais aos dados utilizados nos cálculos teóricos de modo que é possível comparar diretamente o resultado teórico com o resultado da simulação já que está refletirá o modelo teórico adotado.

Deste modo foi criado um fluxograma para orientar e determinar a metodologia a ser aplicada para calibração da simulação. A figura 1 apresentada a seguir apresenta o esquema criado:

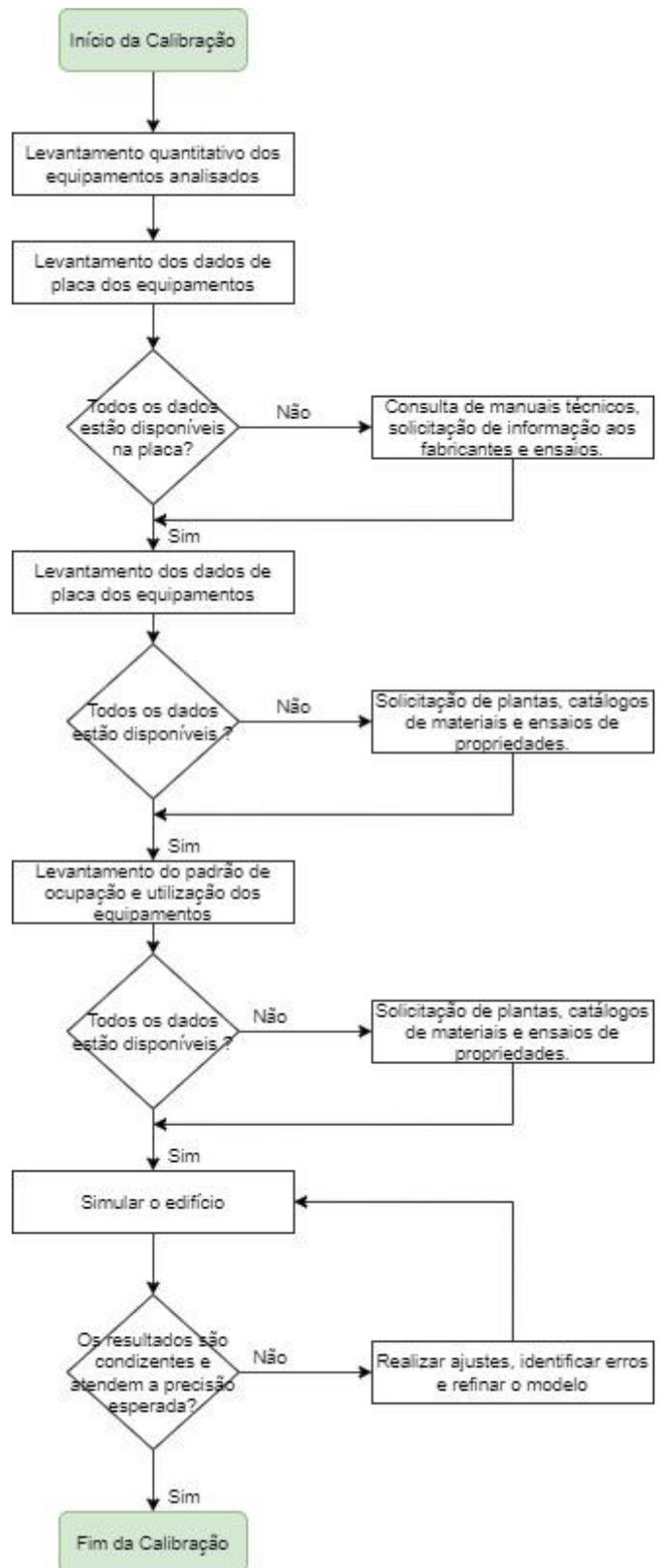


Figura 1: Fluxograma de calibração.

2.2 Simulações Modelo

Foram escolhidos três ambientes modelos para serem simulados visando criar uma calibração que refletisse o perfil de consumo deste ambiente e pudesse ser expandida para o restante do edifício. Optou-se por utilizar ambientes modelo, pois se mostra mais fácil levantar as informações de ambientes menores e torna-se mais fácil identificar as influências e interrelações das grandezas simuladas.

Os ambientes escolhidos foram uma sala de aula, uma sala administrativa e uma sala de professor, pois estas representam mais da metade de todas as salas presentes na edificação.

Realizando as simulações modelo foi possível determinar a metodologia de simulação apresentada anteriormente e elencar todas as variáveis que devem ser obtidas para calibração do projeto.

2.3 Simulações Globais

Após realizar as simulações modelo e definir o método de calibração, foi possível construir o modelo da edificação como um todo para realização da simulação global. Esta seguiu o mesmo procedimento das simulações menores apenas expandindo o aprendizado construído anteriormente.

Vale ressaltar que foi utilizada a versão gratuita de teste para estudantes do software Designer Builder para realizar todas as simulações. Esta versão apresenta a limitação de simular apenas 50 zonas térmicas de cada vez, como seriam necessárias cerca de 320 zonas térmicas para simular o edifício como um todo, foi preciso dividir a faculdade em sete blocos e simula-los separadamente. No fim, somou-se o resultado obtido em cada um para obtenção do resultado final.

Definiu-se a taxa de variação do resultado como a variação entre o resultado obtido e o resultado teórico esperado. Tal taxa foi tratada como uma incerteza segundo a metodologia exposta no apêndice B do PIMVP.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados Parciais

Os resultados de Economia de Energia (EE) obtidos para os ambientes modelo podem ser vistos na tabela a seguir:

Tabela 1: Economia de energia nos ambientes modelo.

	Resultados Teóricos		Resultados Simulados	
	Iluminação	Ar	Iluminação	Ar
EE (kWh/ano)	2222,64	2615,62	2223,91	2622,12
Porcentagem de EE	50%	29,30%	50,02%	29,37%

Foi possível observar que os resultados obtidos por meio das simulações se aproximavam consideravelmente dos resultados obtidos teoricamente o que indica que os parâmetros de entrada utilizados estavam condizentes e criavam um sistema que refletia o esperado.

Além disso, os resultados parciais indicaram que a metodologia utilizada, ou seja, quais dados e parâmetros estavam sendo coletados para calibrar a simulação eram suficientes para representar o consumo de energia do ambiente.

Por fim, foi calculado a taxa de variação do resultado simulado em relação ao valor teórico.

Tabela 2: Taxa de variação dos ambientes modelo

	Iluminação	Ar condicionado
Variação	0,384%	0,504%

É possível observar que a variação é inferior a 1% em ambos os casos o que corrobora com a validade da calibração.

3.2 Resultados Globais

Os resultados de Economia de Energia (EE) obtidos para a edificação podem ser vistos na tabela a seguir:

Tabela 3: Economia de energia no edifícios.

	Resultados Teóricos		Resultados Simulados	
	Iluminação	Ar	Iluminação	Ar
EE (MWh/ano)	111,70	103,58	112,58	104,29
Porcentagem de EE	50,24%	27,17%	50,63%	27,35%

É possível observar que a calibração pode ser expandida para o edifício como um todo obtendo resultados próximos aos calculados teoricamente. Assim a calibração se mostrou robusta o suficiente para refletir o perfil de consumo do edifício.

Além disso, é possível observar que a diferença entre os resultados teóricos e simulados é inferior a 1 MWh por ano. Considerando o resultado teórico, neste caso, como o consumo de energia do edifício é possível notar que essa diferença estaria contemplada na variação aleatória de consumo de energia de uma edificação e estaria dentro da margem de precisão e confiabilidade requerida nos programas de eficiência energética. Assim, foi calculada a taxa de variação do valor simulado em relação ao valor teórico.

Tabela 4: Taxa de variação do edifício.

	Iluminação	Ar condicionado
Variação	2,344%	3,637%

A taxa de variação é mais alta do que seria obtido simplesmente comparando os resultados finais. Isto ocorre, pois a edificação precisou ser dividida em sete partes para execução da simulação e a variação foi tratada como uma incerteza e somada seguindo o exposto no apêndice B do PIMVP.

Embora não existisse medições destes sistemas durante a confecção do trabalho o que não permitiu uma comparação direta da simulação com o consumo de energia da edificação, foi possível desenvolver um método de calibração e determinar todas as variáveis importantes que devem ser determinadas para servirem de dados de entrada para o programa.

Como comentado anteriormente, pretendesse continuar com o trabalho e instalar medidores específicos na instalação de modo a obter seu consumo de energia. Além disso, pretendesse medir de forma estatística e pontual as características dos equipamentos determinando os seus parâmetros de utilização.

Vale ressaltar que o principal objetivo do trabalho foi desenvolver o método de calibração da simulação, assim, quando as medições estiverem disponíveis bastará inserir os novos dados de entrada e comparar o modelo as medidas reais de consumo.

3.3 Curva de Ocupação

As horas diárias de ocupação de cada ambiente foram determinadas pelos cronogramas de utilização das salas e influenciam diretamente o consumo de energia dos equipamentos, pois determinam o número de horas de funcionamento dos aparelhos. Assim, visando apresentar que a variação ao longo do semestre letivo foi considerada na realização das simulações, foram construídos os gráficos de consumo da instalação ao longo do ano. A figura 2 apresenta o consumo de energia simulado para o bloco do departamento de engenharia elétrica da faculdade de tecnologia ao longo do ano.

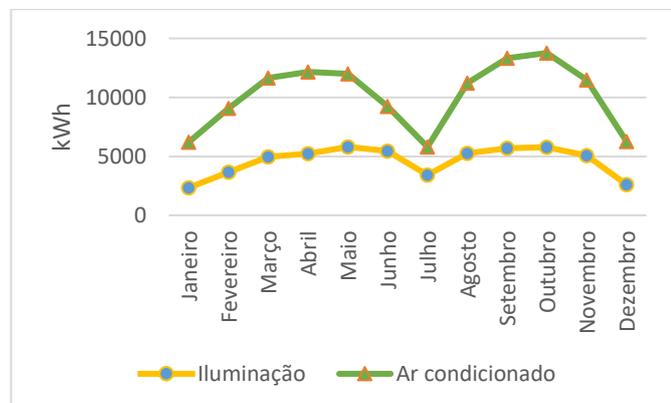


Figura 2: Consumo de energia ao longo do ano.

A partir do gráfico pode se observar que janeiro e dezembro apresentam baixo consumo de energia, isso ocorre devido as férias de fim de ano já que em dezembro a universidade só funciona plenamente nas duas primeiras semanas e em janeiro ainda não há aulas, porém o setor administrativo e os projetos de pesquisa já retornaram. Em fevereiro observa-se que o consumo começa a aumentar com as aulas de verão e com a volta de mais projetos. Em março inicia-se o primeiro semestre letivo e a faculdade tem seu consumo de energia pleno que se mantém nos meses seguintes. É possível observar que o consumo começa a cair em junho devido ao fim do semestre que provoca a redução do número de alunos e aulas. Ainda, é possível observar um vale em julho condizendo com as férias de meio do ano. Em seguida o gráfico segue o mesmo padrão exposto para o segundo semestre.

Por fim, é possível observar que o consumo de energia no sistema de condicionamento ambiental é maior no segundo semestre. Este fato não tem relação com a ocupação, já que está é aproximadamente constante nos dois semestres letivos, e sim com o aumento da temperatura externa já que nestes meses estão concentradas as maiores temperaturas anuais de Brasília e assim aumentando tanto a utilização quanto o regime de funcionamento do ar condicionado e consequentemente aumentando seu consumo de energia.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho procurou apresentar a utilização da simulação computacional como método de medição e verificação para avaliar os ganhos obtidos com um projeto de eficiência energética e trouxe como estudo de caso o projeto realizado na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

O principal ponto abordado no estudo foi o desenvolvimento de um método de calibração para a simulação computacional de modo a entender qual o processo de modelagem de um edifício no software de simulação e quais são os parâmetros chave que devem ser levantados para serem utilizados como dados de entrada. Com um método bem estruturado é possível adaptá-lo e replica-lo para os mais diversos ambientes, respeitando suas particularidades, porém tendo um norte a ser seguido.

A partir dos resultados, observou-se que calibração conseguiu refletir o comportamento teórico do edifício. Como foram utilizados apenas dados de placa dos equipamentos esse resultado é condizente e indica que a calibração atende aos objetivos propostos. As pequenas variações observadas entre os resultados se mantivera dentro da faixa estabelecida no edital da chamada e se mostram válidas.

Para o prosseguimento do trabalho serão instalados medidores na edificação para obtenção de dados reais de consumo dos sistemas que serão comparados aos valores obtidos computacionalmente. Além disso, serão realizadas medidas pontuais para determinação da potência real dos equipamentos e métodos estatísticos para determinar seus parâmetros de operação. Tais dados serão utilizados como entrada no programa de modo a obter os resultados reais de consumo e reavaliar a calibração realizada.

Assim, o estudo atingiu seus objetivos propostos criando a metodologia de calibração e obtendo resultados computacionais condizentes com os resultados teóricos. Assim criou-se as bases necessárias para o prosseguimento dos trabalhos. Além disso, atentou-se para divulgação do método para difundir seu conhecimento e demonstrar que a simulação computacional pode ser utilizada neste tipo de projeto e que gera resultados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a companhia de distribuição CEB-D pelo apoio ao trabalho em especial aos engenheiros Elias e Junior que auxiliaram e orientaram o programa de eficiência energética da Universidade de Brasília responsável pelas ações abordadas neste trabalho. O presente estudo foi realizado no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, na Chamada ANEEL N° 001/2016 "Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", e do Termo de Cooperação Técnica 502/2018, celebrado entre CEB Distribuição S.A. e Fundação Universidade de Brasília, intitulado "Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB"

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira das Empresas do Serviço de Conservação de Energia - ABESCO. “**Matéria: A indústria poderia economizar R\$ 4 Bi por ano com eficiência energética**”. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/industria-poderia-economizar-r-4-bi-por-ano-com-eficiencia-energetica/>. Acessado em junho de 2019.

Brasil. “**Lei eficiência energética: Lei 10295 de 2001**” Brasília, Distrito Federal. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10295.htm Acessado em: 21 de abril de 2019.

British Petroleum – BP, “**BP Statistical Review of World Energy**”. 2018. 67° edição. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> Acessado em: 26 de março de 2019.

Efficiency Valuation Organization - EVO. “**What is M&V**”. 2019. Disponível em: <https://evo-world.org/en/m-v/what-is-m-v>. Acessado em: 25 de março de 2019

Efficiency Valuation Organization – EVO. “**Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance Conceitos e Opções para Determinação de economias de Energia e de Água**”. 2012. Volume 1. Canadá.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. “**Nota técnica EPE 030/2018. Uso de ar condicionado no setor residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**”. Brasília. 2018. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf Acessado em: Agosto de 2019.

Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE. “**Medição e Verificação**”. 2019. Disponível em: http://www.inee.org.br/escos_mev.asp?Cat=mev Acessado em: 25 de março de 2019.

SANTANA, T. E. L. S. e CRUZ, A. F. S. “**Estudo do potencial de conservação de energia através do controle do carregamento de geladeira e ar condicionado**”. Salvador, 2016. UNIFACS, Universidade Salvador. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/viewFile/4353/3021> Acessado em: Setembro de 2019.

US Report of the National Policy Development Group. “**Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency. In: Reliable affordable and environmentally sound energy for the American Future**”. Washington, maio, 2001.