



**Pontifícia Universidade Católica do Paraná**  
**Escola Politécnica**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**Economia de Energia em Ambiente Climatizado Através de Simulação  
Computacional Calibrada**

**Curitiba 2012**

**Economia de Energia em Ambiente Climatizado Através de Simulação  
Computacional Calibrada**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós Graduação  
em Engenharia Mecânica da  
Pontifícia Universidade de  
Católica do Paraná como  
requisito para a obtenção do  
título de Mestre em  
Engenharia

**Orientador: Prof Dr. Nathan  
Mendes**

**Co-orientadora: Profa. Dra. Kátia  
Cordeiro Mendonça**

**Curitiba 2012**

Valério Jose Novak

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e irmãos, pelo constante incentivo.

Agradeço aos meus orientadores pelos seus ensinamentos.

Agradeço aos demais professores do curso que me auxiliaram no entendimento do assunto abordado.

Agradeço a COPEL pelo apoio financeiro.

Agradeço a empresa CITS por seu apoio técnico e suas portas abertas.

E por fim, agradeço a minha esposa Márcia e filha Aline pela compreensão de meus momentos de ausência.

## RESUMO

A eminente escassez mundial da disponibilidade de energia aumenta a importância de investimentos envolvendo ações de eficiência energética, tornando essencial o aprofundamento no tema da utilização da energia. No Brasil, por exigência legal, empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica devem aplicar um percentual da sua receita em projetos de eficiência energética. Uma das principais ações empregadas atualmente neste sentido é a que propõe a substituição de equipamentos elétricos por outros mais eficientes do ponto de vista energético (*retrofit*). Para quantificar a economia de energia gerada por esse tipo de projeto é sugerida a utilização de um dos métodos descrito no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (IPMVP), entre eles estão as simulações energéticas calibradas de energia. É dentro deste contexto que se encontra o presente trabalho. O seu objetivo é avaliar por meio da simulação térmica e energética calibrada de um edifício comercial a redução no consumo anual de energia elétrica proporcionada pela modernização (*retrofit*) do sistema de climatização. O edifício estudado emprega um sistema de condicionamento de ar central a água para climatizar 8 salas de escritórios. Medições de temperatura, demanda e consumo de energia elétrica no resfriador de líquido (*chiller*) do sistema de climatização, além do levantamento da carga térmica, insolação, dimensões, padrão de uso, etc., permitiram a simulação energética calibrada da edificação através de um programa computacional, no caso o e<sup>+</sup> (*EnergyPlus*). Os resultados de economia de energia do sistema são obtidos a partir da subtração dos resultados de simulação do modelo calibrado antes e após as ações de efficientização energética, com as incertezas dos resultados.

## ABSTRACT

The shortage impending global of energy availability increases the importance of investments involving energy efficiency actions, making it essential to deepen the theme of energy use. In Brazil, by legal requirement, utility companies distributing electricity must apply a percentage of their revenue in energy efficiency projects. One of the main actions currently employed in this sense is proposing the replacement of electrical equipment from the perspective the standpoint of energy (retrofit). To quantify the energy savings generated by this type of project is suggested to use one of the methods described in the International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP), among them are the calibrating to energy simulations. It is within this context that we find the present work. Your objective is to evaluate the reducing the annual consumption of electricity provided by retrofit of the HVAC system. The building studied employs a system of central air conditioning water to climatize eight rooms offices. Measurements of temperature, demand and consumption of electric energy in the liquid cooler (chiller) and a survey of the thermal load, heat stroke, size, pattern of use, etc. allowed the simulation of building energy calibrated using a computer program, and in this case (EnergyPlus). The results of energy saving system are obtained from the subtraction of the results of the simulation model calibrated before and after the actions on energy efficiency with uncertainties the result.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1. Matriz Elétrica Brasileira.                                   | 2  |
| Fig. 3.1. Foto aérea do CITS.                                           | 21 |
| Fig. 3.2. Primeiro pavimento                                            | 22 |
| Fig. 3.3. Segundo pavimento                                             | 23 |
| Fig. 3.4. Terceiro pavimento                                            | 23 |
| Fig. 3.5. Quarto pavimento                                              | 24 |
| Fig. 3.6. Vista lateral frontal do prédio principal                     | 24 |
| Fig. 3.7. Prédio Administrativo                                         | 25 |
| Fig. 3.8. Esquema básico do sistema de condicionamento de ar            | 26 |
| Fig. 3.9. <i>Chiller</i> condensação a ar                               | 26 |
| Fig. 3.10. Dados de placa do <i>chiller</i> antigo com condensação a ar | 27 |
| Fig. 3.11. Circuito de água do <i>chiller</i>                           | 27 |
| Fig. 3.12. Bombas centrífugas                                           | 28 |
| Fig. 3.13. Tomadas de ar de retorno                                     | 28 |
| Fig. 3.14. Difusores                                                    | 28 |
| Fig. 3.15. <i>Fan coil</i>                                              | 29 |
| Fig. 3.16. Quadro elétrico principal                                    | 30 |
| Fig. 3.17. Quadro de comando do <i>chiller</i> e <i>Set-Point</i>       | 30 |
| Fig. 3.18. Compressores                                                 | 31 |
| Fig. 3.19. Evaporador tipo <i>Tube</i>                                  | 31 |
| Fig. 3.20. Válvula de expansão                                          | 31 |
| Fig. 3.21. Condensador                                                  | 32 |
| Fig. 3.22. Fluxo de ar no condensador                                   | 32 |
| Fig. 3.23. Novo <i>Chiller</i> 60 TR                                    | 33 |
| Fig. 3.24. Dados de placa                                               | 33 |
| Fig. 3.25. Compressores                                                 | 34 |
| Fig. 3.26. Evaporador <i>Tube</i>                                       | 34 |
| Fig. 3.27. Circulação de água – sistema reformado                       | 34 |
| Fig. 3.28. Condensador                                                  | 35 |
| Fig. 3.29. Ventiladores                                                 | 35 |
| Fig. 3.30. Válvula de expansão                                          | 35 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.31. Prédio principal                                                                                                                         | 36 |
| Fig. 3.32. Prédio administrativo                                                                                                                    | 36 |
| Fig. 3.33. Sala de Desenvolvimento de <i>Hardware</i>                                                                                               | 37 |
| Fig. 3.34. Sala P&D <i>Software</i>                                                                                                                 | 37 |
| Fig. 3.35. Sala Interprice                                                                                                                          | 38 |
| Fig. 3.36. Sala do CPD                                                                                                                              | 38 |
| Fig. 3.37. Sala Siemens Laboratório                                                                                                                 | 39 |
| Fig. 3.38. Sala Landys Gyr                                                                                                                          | 39 |
| Fig. 3.39. Sala da Manutenção                                                                                                                       | 40 |
| Fig. 3.40. Sala Administrativa                                                                                                                      | 40 |
| Fig. 3.41. Analisador de energia                                                                                                                    | 43 |
| Fig. 3.42. Demanda elétrica ativa                                                                                                                   | 44 |
| Fig. 3.43. Consumo de energia elétrica                                                                                                              | 45 |
| Fig. 3.44. Gráfico de temperatura interna                                                                                                           | 45 |
| Fig. 3.45. Monitoramento de temperatura da sala da manutenção                                                                                       | 46 |
| Fig. 3.46. Demanda ativa                                                                                                                            | 47 |
| Fig. 4.1. Curva de distribuição normal                                                                                                              | 54 |
| Fig. 5.1. Representação esquemática do prédio comercial em estudo.                                                                                  | 59 |
| Fig. 5.2. Visualização interna da edificação                                                                                                        | 59 |
| Fig. 5.3. Desenho esquemático das paredes do modelo                                                                                                 | 60 |
| Fig. 7.1. Evolução temporal das temperaturas interna e externas<br>medidas experimentalmente e da temperatura interna simuladas pelo e <sup>+</sup> | 68 |
| Fig. 7.2. Diferença absoluta entre as temperaturas interna<br>medidas experimentalmente e simuladas pelo e <sup>+</sup>                             | 68 |
| Fig. 7.3. Comparação entre as demandas elétricas medida<br>e simulada numericamente                                                                 | 70 |
| Fig. 7.4. Curva de carga elétrica do mês de janeiro obtida através<br>de simulada computacional                                                     | 71 |
| Fig. 8.1. Histograma das ocorrências separado por faixa de consumo                                                                                  | 76 |

**LISTA DE TABELAS**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1. Especificação dos materiais da edificação                  | 22 |
| Tabela 3.2. Especificação dos <i>fan coils</i>                         | 23 |
| Tabela 3.3. Carga Térmica                                              | 41 |
| Tabela 3.4. Dados de levantamento das salas climatizadas               | 42 |
| Tabela 4.1. Comparação entre erro e de incerteza                       | 50 |
| Tabela 5.1. Informações básicas do modelo computacional                | 58 |
| Tabela 5.2. Características dos materiais utilizados na simulação      | 60 |
| Tabela 7.1. Consumo de energia elétrica para o novo <i>chiller</i>     | 67 |
| Tabela 7.2. Consumo de energia elétrica do novo <i>chiller</i> – 60 TR | 69 |
| Tabela 7.3. Consumo simulado                                           | 72 |
| Tabela 8.1. Análise de sensibilidade                                   | 74 |
| Tabela 8.2. Análise da incerteza - pessoas em férias                   | 75 |
| Tabela 8.3. Análise da incerteza - velocidade do ar – infiltração      | 75 |
| Tabela 8.4. Análise da incerteza - troca do ar – infiltração           | 76 |
| Tabela 8.5. Resultados da incerteza                                    | 77 |

## ABREVIATURAS E SIMBOLOS

### Lista de abreviaturas

|         |                                                                                 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------|
| ASHRAE  | ..... American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| AVAC    | .....Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado                                  |
| ESCO    | ..... Empresa de conservação de energia                                         |
| FEMP    | ..... Federal Energy Management Protocol                                        |
| IPMVP   | .....Protocolo Internacional de Medição e Verificação                           |
| MRE     | ..... Medida de racionalização de energia                                       |
| M&V     | ..... Medição e verificação                                                     |
| MCE     | .....Medida de conservação de energia                                           |
| MPEE    | ..... Manual do Programa de Eficiência Energética                               |
| COPEL   | .....Companhia Paranaense de Energia Elétrica                                   |
| BESTEST | ..... Building Energy Simulation Test                                           |

### Lista de símbolos

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| W              | ..... Watt           |
| kWh            | ..... Quilowatt-hora |
| m <sup>2</sup> | ..... Metro quadrado |
| S <sup>2</sup> | .....Variância       |
| N              | ..... Número de dias |
| EP             | .....Erro padrão     |
| $\sigma$       | ..... Desvio padrão  |
| $\mu$          | ..... Média          |

## SUMÁRIO

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMO.....                                                 | ii        |
| ABSTRACT .....                                              | ii        |
| LISTA DE FIGURAS.....                                       | iv        |
| LISTA DE TABELAS .....                                      | vi        |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS .....                      | vii       |
| <br>                                                        |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Contextualização do problema .....                      | 1         |
| 1.2 Objetivo .....                                          | 7         |
| 1.3 Metodologia.....                                        | 7         |
| 1.3 Organização do Trabalho .....                           | 10        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                        | <b>11</b> |
| 2.1 Introdução .....                                        | 11        |
| 2.2 Simulação Computacional e a Eficiência Energética ..... | 11        |
| <b>3 ESTUDO DE CASO .....</b>                               | <b>21</b> |
| 3.1 Característica do Edifício.....                         | 21        |
| 3.2 Sistema de Climatização .....                           | 25        |
| 3.3 Sistema Antigo .....                                    | 26        |
| 3.4 Sistema Novo .....                                      | 32        |
| 3.5 Levantamento.....                                       | 36        |
| 3.5.1 Sala de Desenvolvimento de Hardware.....              | 37        |
| 3.5.2 Sala P&D Software .....                               | 37        |
| 3.5.3 Simens Interprice.....                                | 38        |
| 3.5.4 Sala P&D .....                                        | 38        |
| 3.5.5 Sala Siemens Laboratório .....                        | 39        |
| 3.5.6 Sala Landys Gyr .....                                 | 39        |
| 3.5.7 Sala da Manutenção.....                               | 40        |
| 3.5.8 Sala da Administração.....                            | 40        |
| 3.5.9 Dados Consolidados do Levantamento .....              | 43        |
| 3.6 Medições Reais de Energia.....                          | 43        |
| 3.6.1 Dados Medidos - <i>Chiller</i> Novo .....             | 44        |
| 3.6.2 Dados Medidos - <i>Chiller</i> Antigo .....           | 46        |
| 3.6.3 Observações Referente as Medições de Campo .....      | 47        |

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.4 Plano de Medição e Verificação .....           | 48        |
| <b>4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO .....</b>                  | <b>49</b> |
| 4.1 Incerteza Referente a Amostragem.....            | 51        |
| 4.2 Incerteza Referente a Estimativas.....           | 51        |
| 4.3 Incerteza Referente a Modelagem .....            | 52        |
| 4.4 Incerteza Referente a Medição .....              | 55        |
| <b>5 MODELAGEM.....</b>                              | <b>57</b> |
| 5.1 Ferramenta de Simulação Termoenergética .....    | 57        |
| 5.2 Modelo Computacional.....                        | 58        |
| <b>6 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO .....</b> | <b>62</b> |
| 6.1 Metodologia de Simulação .....                   | 62        |
| 6.2 Metodologia de Calibração.....                   | 63        |
| <b>7 SIMULAÇÕES DO MODELO BASE.....</b>              | <b>66</b> |
| 7.1 Análise da Fatura .....                          | 66        |
| 7.2 Temperatura Interna.....                         | 67        |
| 7.3 Consumo de Energia.....                          | 69        |
| 7.4 Demanda de Energia Elétrica.....                 | 69        |
| 7.5 Economia de Energia .....                        | 71        |
| <b>8 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E INCERTEZA .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....</b>     | <b>78</b> |
| REFERÊNCIAS .....                                    | 80        |

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Contextualização do problema**

Em tempos onde é crescente a necessidade energética da sociedade, aumenta-se a importância de ações voltadas à eficiência energética, ou seja, a de se utilizar a energia entre as suas diferentes formas de modo inteligente e eficaz, reduzindo seus desperdícios, as perdas técnicas e as perdas para o meio ambiente.

O crescimento econômico implica geralmente em maior consumo de energia, mas quando a utilização da energia é realizada de forma eficiente e sustentável traz benefícios a diversos setores, como exemplo para o industrial, com a produção de bens cada vez mais baratos e competitivos.

No Brasil existem várias iniciativas envolvendo ações de eficiência energética. Entre elas destacam-se a substituição de equipamentos por outros mais eficientes do ponto de vista energético (*retrofit*), a difusão dos conceitos deste assunto realizada por empresas de Conservação de Energia (ESCOS), a legislação nacional que estabelece níveis mínimos de eficiência para equipamentos elétricos, a execução de projetos de eficiência energética em atendimento a obrigações legais do setor de distribuição de energia elétrica e a certificação voluntária de edificações segundo regulamentação específica.

A Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, obriga empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica a aplicar um percentual mínimo da sua receita operacional líquida em Programas de Eficiência Energética – PEE. A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL com base em sua Resolução Normativa nº 300 de 12 de fevereiro de 2008 regulamenta um Manual do Programa de Eficiência Energética – MPEE, que se resume a um guia determinativo de procedimentos para elaboração e execução de projetos de eficiência energética. Para o ano de 2013 é aguardado a substituição do MPEE por outro manual equivalente com algumas melhorias evidenciadas durante seus vários anos de utilização.

Com a implementação de ações de eficiência energética, as empresas distribuidoras de energia buscam, entre outros benefícios, postergar investimentos nos setores de geração, transmissão e distribuição de energia e reduzir os

impactos ambientais gerados, além disso, é mais barato conservar do que gerar energia.

Dessa forma, milhões de reais anualmente são investidos em diversas tipologias de projetos: educacionais, gestão energética, comércio e serviços, industrial, comunidades de baixo poder aquisitivo, poder público, residencial, rural, serviços públicos, entre outros.

Segundo o Balanço Energético Nacional - BEN (2012), houve aumento da eficiência energética no Brasil em 2011. O total da energia demandada no país teve um crescimento de 1,3% em 2011 ante 2010. Essa evolução do crescimento do consumo foi menor do que a do PIB (soma de todas as riquezas produzidas no Brasil), que, expandiu 2,7%. Um menor crescimento da demanda de energia significa que a economia brasileira gastou menos energia para produzir a mesma quantidade de bens e serviços. Outra informação importante pode ser observada na matriz elétrica brasileira (figura 1.1), onde a energia gerada pelas hidrelétricas (renovável) representa mais de 80 % da geração da eletricidade do país.

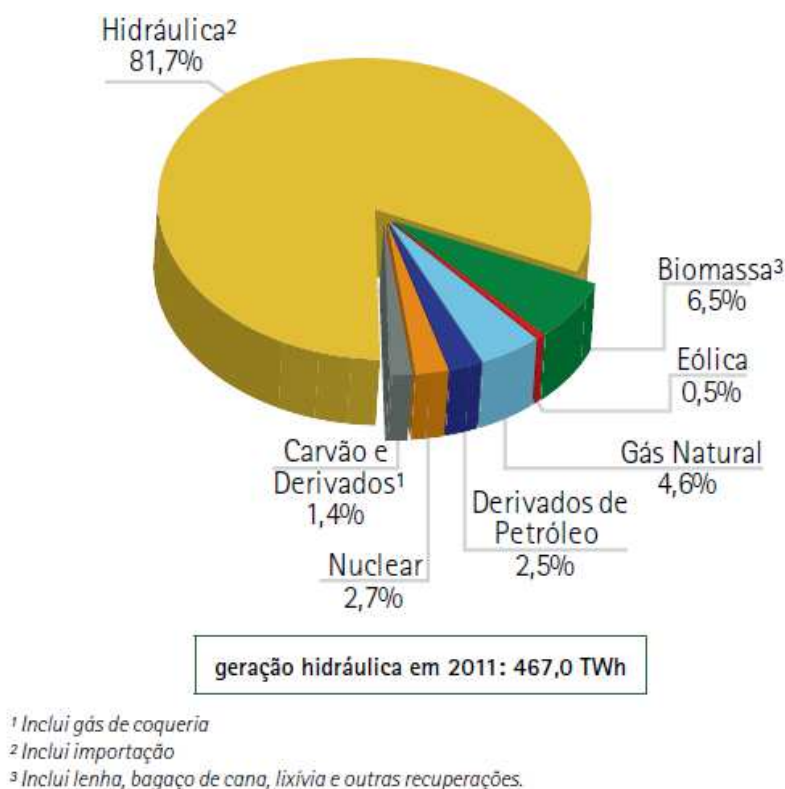


Fig. 1.1. Matriz Elétrica Brasileira – fonte BEN.(2012)

A principal ação atualmente empregada pelas concessionárias, visando à utilização dos recursos financeiros previstos pela legislação são as que propõem a substituição de equipamentos que estão em utilização e obsoletos por outros de melhor tecnologia e eficiência energética (*retrofit*).

De acordo com o MPEE (2008),

O objetivo desse Programa é demonstrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia elétrica e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Para isso, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada no âmbito desse Programa. Busca-se, enfim, a transformação do mercado de energia elétrica, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos racionais de uso da energia elétrica.

Para que as empresas concessionárias de energia elétrica possam aplicar recursos financeiros na execução de projetos de eficiência energética é necessário que haja viabilidade técnica e econômica calculada através de metodologia específica demonstrada no MPEE onde são analisados vários fatores, entre eles: energia conservada, ou seja, economizada, vida útil dos equipamentos, economia decorrente do adiamento de investimentos no setor elétrico, valores de aquisição e instalação dos materiais e equipamentos, juros, entre outros.

Todo o projeto de *retrofit* implementado por exigência legal da ANEEL deve obter como resultado a redução da demanda elétrica no horário de ponta (kW) e economia no consumo da energia elétrica (MWh/ano). Isto assegura o retorno do investimento realizado, pois a tendência é que o investimento seja recuperado ao longo da vida útil de equipamentos.

Rafferty *et al.* (2009) sugerem que para as orientações técnicas da avaliação da economia de energia gerada envolvendo projetos de *retrofit* de equipamentos seja seguido um dos três documentos a seguir: Diretriz 14 de 2002 - ASHRAE (2002), Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance - *Efficiency Valuation Organisation* (2007) ou o *Federal Energy Management Program (FEMP) - Guide* (2008). O MPEE sugere somente a utilização do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance – IPMVP (2010).

Segundo o IPMVP (2010) existe a necessidade da normalização de métodos para quantificar os resultados da economia e dos investimentos aplicados na eficiência energética através de ações de medição e verificação (M&V). Este manual inclui a possibilidade da utilização de simulações energéticas calibradas, em algumas situações, que serão melhores detalhadas posteriormente, como uma das formas de avaliação das medidas de conservação de energia (MCE) dos projetos.

A M&V é uma maneira de assegurar que os projetos sejam avaliados em uma base científica e sob método acordado entre os interessados em diferentes tipos de projetos de eficiência energética. De acordo com o IPMVP (2010) a economia de energia não pode ser medida diretamente, uma vez que representa a ausência de consumo de energia. Desta forma, a economia de energia é determinada pela comparação entre o consumo medido antes e depois da implementação das ações de eficiência energética.

São apresentadas quatro opções de ações de M&V no IPMVP (2010) para avaliar de forma transparente, segura e consistente a economia de energia. Os métodos diferem e a escolha entre as opções implica em muitas considerações incluindo a análise do quanto se está disposto a gastar com a etapa de M&V do projeto.

No caso de um projeto de eficiência energética em uma edificação, realizar a etapa de M&V implica freqüentemente em relações bastante complexas entre o consumo de energia medido ou simulado antes e após a implementação das ações, como também no controle de variáveis independentes como: clima, condições de umidade, insolação, ocupação incertas de pessoas, férias, etc. Diante disso, deve haver cuidados especiais na comparação dos resultados dos consumos de energia antes e após a implementação dos projetos, de forma que correções sejam realizadas devido às freqüentes mudanças das variáveis independentes ou até mesmo de fatores estáticos como: *lay-out* de móveis e equipamentos, forma construtiva da própria edificação, etc.

De acordo com o IPMVP (2010), a etapa de M&V pode ser realizada por uma das seguintes técnicas: fatura da concessionária de energia, medidores de grandezas e simulação por computador. Com base nessas premissas são especificadas quatro opções para a realização da M&V em projetos de eficiência energética regulamentados pela ANEEL:

- Opção A: medição local do parâmetro chave e estimativa dos demais;
- Opção B: medição local de todos os parâmetros envolvidos;
- Opção C: fatura da concessionária de energia;
- Opção D: simulação computacional.

Um exemplo clássico para a opção A é a análise do consumo de energia elétrica de sistemas de iluminação de um prédio, onde se estima o tempo de utilização (horas) e realiza-se a medição instantânea da potência elétrica ativa (W) através de um equipamento de medição chamado wattímetro.

Na iluminação é possível também aplicar a opção B, como por exemplo, o caso de melhorias implementadas por meio de sensores de presença que alteram o tempo de utilização e há também a substituição de lâmpadas incandescentes por outra tecnologia mais eficiente sob o ponto de vista energético. Assim deve-se avaliar todos os parâmetros necessários para o cálculo da energia, ou seja, potência (Watt), tempo (horas), dentre outros parâmetros que possam influenciar os resultados. A análise dos dados deve ocorrer no interior de uma fronteira de medição e durante um período que retrate um ciclo completo de funcionamento do sistema.

A opção C é mais bem aplicada onde múltiplas MCE são implementadas e pretende-se avaliar todo o desempenho energético da instalação por meio das faturas ou leituras dos medidores existentes da concessionária de energia. Neste caso é difícil mensurar a contribuição de cada ação de conservação de energia de modo separado na economia de energia.

Já para na opção D existe a necessidade de se criar um modelo de simulação computacional, devendo este ser calibrado por técnicas adequadas, de modo a obter um cenário que corresponda aproximadamente à realidade. Um das principais aplicações desta técnica de M&V é quando no *retrofit* de um sistema de condicionamento de ar os dados de energia do consumo de referência (sistema antigo) estão indisponíveis ou não são de confiança. Dessa forma é possível calibrar e simular o modelo a partir de dados do ambiente dotado com o novo sistema de condicionamento de ar, como também simular com dados do equipamento retirado o cenário energético antigo. Considerou-se também na análise para aplicação desta opção de M&V deste estudo, que os efeitos interativos desta medida de conservação de energia - MCE são complexos,

fazendo com que as técnicas de isolamento das Opções A e B (medições em campo) seriam impraticáveis. Ainda o protocolo (IPMVP) prevê que a opção D pode ser usada para avaliar apenas o desempenho energético de sistemas individuais numa instalação, semelhante às Opções A e B. Neste caso, o consumo de energia do sistema deve ser isolado do resto da instalação através de medidores apropriados.

De acordo com o M&V Guidelines (2008), o IPMVP é um documento de orientação que fornece uma estrutura conceitual na medição, computação, comunicação e economias obtidas em projetos de eficiência energética.

As técnicas descritas de M&V no IPMVP são muito utilizadas também em contratos de desempenho energéticos geralmente utilizados por Empresas de Conservação de Energia (ESCO), pois o seu negócio (atividade) é fornecer capacidades de engenharia, projeto, gestão na construção, mão-de-obra e equipamentos a vários setores da economia. Estes serviços e/ou equipamentos geralmente são pagos por meio das economias de energia geradas pela implementação do projeto e quantificadas por técnicas adequadas, ou seja, pelas opções A, B, C ou D do IPMVP ou ainda pela aplicação de metodologias de algum outro guia de M&V de referência.

Neste trabalho estuda-se e avalia-se, sob o ponto de vista térmico e energético, a economia de energia elétrica gerada pela execução de um projeto já realizado de eficiência energética proporcionado pela modernização (*retrofit*) do sistema de climatização em um edifício comercial (substituição de um *chiller* obsoleto por outro mais moderno e eficiente). Este projeto foi promovido pela concessionária de energia elétrica COPEL Distribuição S.A. em conformidade à legislação pertinente.

## 1.2 Objetivo

O Objetivo geral é estudar a simulação termoenergética por meio computacional baseado em critérios estabelecidos em bibliografia reconhecida internacionalmente de forma a obter resultados confiáveis de economias de energia em projetos de eficiência energética regulamentados pela ANEEL.

O objetivo específico é entender e aplicar corretamente a ferramenta de simulação computacional em uma edificação real visando quantificar a eficiência energética do sistema de condicionamento térmico ambiental.

## 1.3 Metodologia

A implementação da M&V por meio de simulação calibrada, ou seja, a Opção D do IPMVP (2010) implica na utilização de um programa computacional para prever o consumo de energia e a demanda elétrica dos equipamentos antes e após a implementação do projeto de modernização do sistema de climatização, sendo que o modelo computacional de simulação deve ser calibrado. Após as simulações, os consumos da energia elétrica antes e após as ações de efficientização são subtraídos (equação 1), gerando os valores de economia de energia.

$$\text{Economia de energia (kWh)} = \text{consumo 1 (antes)} - \text{consumo 2 (depois)} \pm \text{ajustes} \quad (1)$$

A precisão dos valores da economia gerada pela opção D depende do desempenho dos modelos de simulação, da calibração, da experiência do avaliador e do orçamento (recursos) da M&V. As incertezas de medição referente aos resultados obtidos serão detalhadas em capítulo específico.

Baseado no IPMVP (2010) os principais passos para a execução da M&V em questão são os seguintes:

- reunir os dados necessários para a calibração do modelo;
- assumir outros parâmetros de entrada necessários;
- realizar a simulação com todos os dados disponíveis: carga térmica, dimensões, etc;

- comparar os resultados de consumo de energia elétrica e temperatura interna simulada com os dados de energia e temperatura medidos em campo, em uma base mensal, diária e/ou horária;
- Avaliar diferenças entre os resultados da simulação e os dados da medição em campo, elaborando gráficos de barras e gráficos de dispersão x-y para identificar os padrões de erro;
- Avaliar a precisão da calibração do modelo computacional necessária que deve ser compatível com o orçamento da M&V;
- Se necessário, rever os dados de entrada no primeiro passo e repetir todos os outros, recorrendo a informações de funcionamento reais da instalação (ajustes).

Para que uma simulação termoenergética seja bem sucedida, é necessário acompanhar a rotina da edificação antes da implementação das ações de eficiência energética, assim erros no modelo podem ser detectados.

Normalmente o período de referência (antes da implementação do projeto) é ajustado com base nas variáveis independentes ou estáticas, tornando assim a comparação (subtração) proposta pela equação 1 correta em um mesmo cenário de utilização, ou seja, os períodos devem ser comparados em um mesmo conjunto de condições.

Segundo o IPMVP (2010) para a opção D, a equação 1 pode sofrer duas variações, onde a primeira sugere a utilização da simulação computacional do modelo nos dois períodos (antes e após a MCE), resultando na equação 2. Esta versão presume que o erro de calibração afeta igualmente ambos os modelos.

$$\text{Economia de energia (kWh)} = \text{energia do período de referência do modelo calibrado sem a MCE} - \text{energia do período pós retrofit do modelo calibrado com a MCE} \quad (2)$$

Outra variação da equação 1 sugere a utilização dos valores (grandezas) reais medidos no período *pós-retrofit* ou no *período de referência*, e a utilização da simulação computacional no outro membro da equação 2, determinando assim o consumo de energia nos dois cenários, ou seja, antes e após a implementação do

projeto. Entretanto, deve-se inserir na equação o erro de calibração (equações 3 e 4).

*Economia de energia (kWh) = energia do período de referência (simulado) do modelo calibrado sem a MCE – energia real (medida) do período de calibração com MCE +/- erro de calibração* (3)

*Economia de energia (kWh) = energia real (medida) do período de calibração (sem MCE) - energia do período de pós retrofit (simulado) do modelo calibrado com a MCE +/- erro de calibração* (4)

De forma a facilitar a determinação da economia de energia devida à implementação da MCE, será abordada neste trabalho a equação 2, assim os erros de calibração antes e após a implementação da MCE irão se anular.

De acordo com o IPMVP (2010), a opção D é útil quando:

- Os dados de energia do consumo do **período de referência** não existem ou não estão disponíveis. Tal situação pode surgir por: uma nova instalação contendo medidas de eficiência energética, que precisam ser avaliadas separadamente do resto da instalação, ou quando um agrupamento de equipamentos com medição central, onde não existe nenhum medidor individual da instalação no período do consumo de referência, mas onde esses estarão disponíveis depois da instalação das MCE's.
- Os dados da energia do **período pós retrofit** não estão disponíveis ou estão escondidos por fatores difíceis de quantificar. Às vezes é demasiado difícil prever como as futuras alterações da instalação podem afetar o consumo de energia. Alterações do processo industrial ou o novo equipamento tornam frequentemente o cálculo dos ajustes não periódico tão inexato que as Opções A, B ou C iriam criar um erro excessivo na determinação da economia.
- Quando se deseja determinar a economia associada às medidas de racionalização de energia individuais, mas as medições com as Opções A ou B são muito difíceis ou dispendiosas.

O IPMVP (2010) sugere como principais abordagens das simulações calibradas os projetos que envolvam inclusões de ações de eficiência energética na concepção de novas instalações ou quando várias MCE's interagem entre si e os estudos se tornam complexo.

Também é estabelecido pelo IPMVP (2010) que a opção D pode ser usada para avaliar o desempenho energético de sistemas individuais de uma instalação onde existe uma maior complexidade de medição. Neste caso, a medição do consumo de energia do sistema deve ser isolada do restante da instalação.

Os custos da aplicação de uma M&V não podem atingir níveis que inviabilizem a MCE. O projetista de qualquer M&V deve buscar resultados

confiáveis a partir de um orçamento que seja considerado pelos envolvidos satisfatório.

#### **1.4 Organização do Trabalho**

O presente trabalho está organizado em nove capítulos. No primeiro há uma introdução sobre a eficiência energética e sobre a obrigação legal das concessionárias de energia elétrica, um relato sobre a M&V em projetos de eficiência energética, definições da metodologia de calibração para a simulação térmica e energética da edificação a ser avaliada e expressa à equação que será utilizada para o cálculo da economia de energia. O segundo capítulo faz uma revisão dos trabalhos existentes sobre a simulação térmica e energética de edificações. No terceiro capítulo, existe uma descrição detalhada do edifício a ser analisado, incluindo os padrões de uso e o sistema de climatização. O quarto capítulo analisa a questão das incertezas de medição. Já no quinto capítulo detalha-se a ferramenta de simulação empregada na análise desejada e a modelagem da edificação. No sexto capítulo é encontrada a metodologia de simulação e calibração térmica e energética da edificação. Os resultados e suas devidas comparações são demonstrados no sétimo capítulo. O oitavo capítulo mostra uma análise de sensibilidade e calcula as incertezas. No nono e último capítulo são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e as perspectivas futuras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica abrangendo trabalhos desenvolvidos nos meio acadêmicos e científicos pertinentes ao tema proposto. São demonstrados resultados, análises e experiências envolvendo modelos computacionais e eficiência energética em sistemas de condicionamento de ar.

### **2.2 Simulação Computacional e Eficiência Energética**

Pedrini (1997) em sua dissertação de mestrado propôs métodos de determinação e calibração de modelos para a simulação térmica e energética de edificações. Neste trabalho, os modelos de simulação foram obtidos a partir de vários níveis de entendimento do edifício. A calibração consistiu na correção ou ajuste das características das edificações atribuídas no modelo que formaram as variáveis de entrada. Segundo o autor existem várias técnicas de calibração de modelos entre elas a que emprega medições de uso final da energia elétrica. As variáveis de entrada no modelo podem se tornar de nível de entendimento complexo. Conforme demonstrado por Pedrini o modelo mais simples a ser calibrado deve reunir informações como demanda e consumo de energia do prédio, auditorias energéticas, projetos arquitetônicos, memorial de construção e catálogos dos equipamentos. Estes modelos podem ser melhorados a partir de dados mais detalhados, como consumo de energia horária e por uso final, como também o monitoramento de temperatura e umidade. Em relação à temperatura interna em projetos de condicionamento de ar, deve-se ter especial atenção, no seu monitoramento, o qual deve ocorrer no retorno dos climatizadores. Deve-se utilizar na simulação o arquivo climático real da cidade.

Westphal *et al.* (1997), realizaram a simulação energética da iluminação de um prédio no programa *Visual Doe*. Foi necessário coletar informações reais para a criação de um modelo computacional. A estimativa do consumo de energia do sistema de refrigeração foi estimada a partir da análise da fatura da concessionária de energia elétrica e da curva de carga do edifício, o que representou cerca de 38 % do consumo total do prédio.

Westphal *et al.* (1999), em um estudo de viabilidade econômica de uma alternativa de *retrofit*, salientam que se deve ter o cuidado de considerar como investimento apenas os dispêndios com as reformas ou instalações de equipamentos com a função específica de melhorar a eficiência energética do sistema. Sendo comum que prédios que necessitem de uma atualização tecnológica de seu sistema elétrico, também requeiram reforma ou conserto de alguns instalações ou acessórios.

Augenbroe (2001) relata que as tendências das ferramentas de simulação energética em edifícios são movidas pelas necessidades em melhorar as decisões de desempenho energético. O desafio é melhorar a integração da simulação em todas as fases do processo de construção. Ainda analisa que a Internet se torna um componente integrante de equipes de projeto, pois as distâncias são encurtadas com a discussão entre profissionais de *design* e engenharia.

Segundo Neymark *et al.* (2002), a validação dos programas de simulação de energia é realizada por uma combinação de validação empírica e por verificação analítica e comparativa. Para uma validação empírica é necessária que se estabeleça uma confirmação dos resultados, visando à avaliação da capacidade do modelo em analisar comportamento físico real. No nível mais simplista de validação empírica, o uso de energia real de longo prazo de um edifício é comparado com os resultados simulados. É observado pelos autores que a validação empírica somente se completa quando são analisadas as incertezas dos resultados. A verificação analítica e comparativa normalmente utiliza o procedimento de diagnóstico comparativo BESTEST.

Kikegawa *et al.* (2003), estudaram o aumento do consumo de energia causados pelo fenômeno de aquecimento urbano, ou seja, aumento de temperatura e o retardo do resfriamento pela inércia térmica do ambiente devido às calçadas, edificações, etc. Em Tóquio nos últimos anos a demanda elétrica do sistema chega a aumentar até cerca de 3% a cada grau de elevação de temperatura.

Yoon *et al.* (2003) desenvolveram um método de calibração sistemática utilizando uma abordagem de análise de base de "carga" que desagrega a energia total consumida em detalhes de subáreas visando melhores análises energéticas. O resultado do estudo de caso realizado em um edifício na cidade de Seul indicou que a abordagem proporcionou uma melhor confiabilidade e precisão da

simulação energética do edifício. Os autores relatam ainda que o número de projetos de *retrofit* aumentou na Coreia, pois muitos edifícios naquele país são antigos, construídos na década de 1970. O elemento chave desses projetos de *retrofit* é a quantificação da economia de energia através de auditoria que pode ser realizado seguindo as orientações do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance - IPMVP, sendo necessário de criação de modelos calibrados.

Matos (2004) realizou uma análise computacional em sistemas de iluminação. A calibração ocorreu através de comparações com os valores obtidos em medições *in loco* e as simulações realizadas nos mesmos horários, dia e mês do ano, em que as medições efetuadas. Como conclusão foi observada diferenças significativas entre os resultados obtidos através da simulação e os valores medidos e campo.

Alves *et al.* (2005) propuseram a análise através de simulações de diferentes alternativas de “*retrofitting*” da fachada de vidro de uma sala de escritório, e conseguiu obter ganhos de até 2384 kWh/ano. O programa de simulação termoenergética utilizado foi o *EnergyPlus*.

Baltar (2006) em sua dissertação de mestrado propôs analisar as condições térmicas de edificações e concluiu que os programas de simulação são ótimas alternativas para esses trabalhos, porém os programas computacionais devem ser validados, isto é, ter seus resultados comparados com outros programas de simulação de energia. O método adotado pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) como norma para o teste e avaliação de programas computacionais voltados à análise energética de edificações é o BESTEST (*Building Energy Simulation Test*). A autora relata que as zonas térmicas na simulação computacional são como um volume de ar a uma temperatura uniforme, onde cada zona é um sistema independente de controle térmico. A edificação deve ser separada em zonas térmicas o que possibilita analisar separadamente a resposta termoenergética de diferentes ambientes. Isto permite a identificação de setores da edificação que demandam uma maior ou menor potência de condicionamento de ar, o que é impossível de ser obtido caso haja apenas uma zona térmica.

Zhizhong *et al.* (2006) analisaram algumas medidas de conservação de energia (MCE) em dois prédios comerciais em Xangai, através da simulação computacional calibrada. Os dados detalhados de entrada foram coletados a fim de construir modelos com o programa DOE-2 (programa computacional utilizado para análises energéticas). Os resultados da saída da simulação foram comparados com a medição do consumo de energia (histórico de 12 meses) a fim de refinar e calibrar os modelos. Algumas MCE utilizando os modelos calibrados foram simuladas com o objetivo de descobrir quais seriam as melhores opções para a implementação visando à economia de energia. Chegou-se a conclusão que para haver economia de energia o sistema de iluminação deveria ser melhorado utilizando equipamentos mais eficientes, além da instalação de um controle variável nas bombas de água quente e fria. Os autores relatam que a calibração do modelo é uma técnica necessária e importante para obter precisão e usabilidade de simulação de energia.

Hopfe *et al.* (2006), relatam que a entrada de dados na simulação computacional é baseada na experiência e suposições. Desta forma, são introduzidas incertezas em que a qualidade dos resultados da simulação é dependente. Afirmam também que a análise das incertezas (UA) e a análise da sensibilidade (SA) são dois diferentes temas. A UA avalia a incerteza no modelo, e a SA avalia as contribuições das entradas para o total de incerteza nos resultados. Existem vários procedimentos possíveis para realizar a análise de incerteza e de sensibilidade, entre eles a análise de Monte Carlo (MCA). O MCA é um dos mais comuns métodos utilizados para analisar a distribuição aproximada de resultados possíveis com base probabilística dos dados. Esse método analisa o caso de forma global, pois permite verificar o quanto a incerteza de um dado de entrada influencia a incerteza do resultado.

Zhai e Chen (2006) propuseram categorias de características de construção e ambientais que podem influenciar no consumo energético de um edifício, são elas: condições ambientais (temperatura externa e radiação solar), sistema de condicionamento de ar (radiação de aquecimento e arrefecimento e ventilação), ocupação e condições operacionais (carga interna e calendários de utilização), propriedades dos materiais de construção (telhado, teto, paredes, etc.), tamanho da construção e aberturas (janelas, portas, etc.).

Hernandez Neto *et al.* (2007) relatam que uma das principais preocupações para os gestores de instalações é como avaliar e prever o consumo de energia de um edifício, especialmente para aqueles que dispõem de sistemas de condicionamento de ar. A principal desvantagem é causada pela variação que tais sistemas produzem no consumo de energia elétrica. Estas variações são devidas a mudanças nas condições climáticas externas, flutuações dos números de ocupantes ao longo do dia e as cargas elétricas internas instaladas no edifício.

Segundo Westphal (2007) na calibração dos modelos de simulação o usuário procura ajustar os dados de entrada para obter uma representação adequada do comportamento energético da edificação em análise. No trabalho foi utilizado técnicas de análise de incertezas e sensibilidade sobre modelos computacionais para estabelecer uma metodologia de apoio ao processo de calibração. O autor aplicou a sua metodologia na simulação de um edifício de escritórios utilizando o programa *EnergyPlus* e identificou que a densidade de cargas internas, os padrões de uso e o coeficiente de performance do sistema de condicionamento de ar como sendo os parâmetros de maior impacto no consumo energético. O consumo anual médio da edificação simulado foi de 145 MWh  $\pm$  11%, ao nível de 95% de confiabilidade, quando o consumo real da edificação era de 149 MWh.

Melo (2007) em sua dissertação analisou a influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações e concluiu que o aumento da transmitância térmica da cobertura reflete o aumento do consumo anual das edificações. Segundo a autora, estes resultados contradizem os limites máximos de transmitância térmica para paredes e coberturas apresentados na ASHRAE *Standard* 90.1, de acordo com o clima no qual a edificação estava inserida. Porém, esta norma não menciona as condições de uso da edificação ao estabelecer esses limites. Através dos relatórios de saída fornecidos pelo *EnergyPlus* foi possível analisar o consumo dos sistemas de condicionamento de ar e o pico de carga de cada equipamento.

Crawley (2008) desenvolveu uma metodologia para criar arquivos de tempo que representam cenários de mudanças climáticas até o ano 2100 e analisa impactos nas ilhas de calor (aglomerados de concreto das cidades) nos dias de hoje. Edifícios fictícios de escritórios pequenos foram criados para representar boas práticas e de baixo consumo energético ao redor do mundo. Os resultados

da simulação para estes edifícios protótipos fornecem uma visão dos potenciais impactos dos futuros cenários climáticos sobre o desempenho dos edifícios.

Sébastien e Philippe (2009) buscaram calcular o consumo de energia de um escritório, utilizando dados meteorológicos de Paris, propondo avaliar com precisão o consumo de energia de um sistema de condicionamento de ar utilizando um *chiller* de absorção por energia solar através do programa Trnsys. Concluiu-se que a utilização de energia elétrica é reduzida em 34,9% em comparação com um ar condicionado clássico.

Shimoda *et al.* (2009) desenvolveram modelos numéricos para simular o consumo de energia de uma edificação antes e depois de ações de melhorias energéticas em equipamento de condicionamento de ar, analisando inclusive a precisão do modelo com base na comparação dos dados de medição da edificação. A partir do resultado dessa comparação, alguns parâmetros relacionados com o controle operacional do sistema e a eficiência do *chiller* foram modificados. A determinação do coeficiente de desempenho do *chiller* (COP) do fator de carga parcial e a temperatura da água foram definidas a partir de catálogos fornecidos pelo fabricante. Os resultados da simulação mostraram que a eficiência energética do sistema de climatização melhorou em 31%.

Haase *et al.* (2009) analisaram na Noruega diferentes edifícios eficientes sob o ponto de vista energético utilizando as seguintes ferramentas de simulação: *Trnsys*, *Esp-r*, *EnergyPlus* e *Simien*. Um dos focos foi à comparação entre essas ferramentas e a precisão em prever o desempenho em termos de conforto térmico e consumo de energia. Os resultados mostraram que existem diferenças significativas nos resultados das várias ferramentas de simulação. Concluiu-se que melhorias significativas na descrição do modelo padrão são necessárias, além de elevar os esforços a fim de padronizar os relatórios de entrada e saída quando se utiliza várias ferramentas de simulação. Verificaram-se elevadas divergências na previsão do consumo de energia e temperatura interna no verão.

Hoes *et al.* (2009) analisaram o comportamento dos ocupantes da edificação e das características operacionais através de simulações com o programa de simulação computacional *ESP-r*. Verificou-se que o ocupante tem influência variável devido à sua presença nas atividades no prédio, como também devido a ações de seu controle que visam melhorar as condições ambientais internas (qualidade térmica, do ar, luz, ruído, etc.). O estudo de caso representou

variação nos parâmetros de entrada em 5 modelos diferentes. A avaliação dos resultados ocorreu através do valor do desvio padrão, onde um valor de desvio padrão pequeno indica que o modelo é menos sensível ao comportamento do ocupante.

De acordo com Hopfe (2009) um grande desafio nas simulações energéticas é lidar com dificuldades como: variedade de parâmetros de entrada, complexidade de fatores não-lineares, descontinuidade e as incertezas. A utilização de uma análise de sensibilidade e de incerteza ao longo do processo de projeto é de grande importância. Os métodos para análise de sensibilidade local, como por exemplo, diferencial (DSA) ou de perturbação são mais fácil de serem aplicados, mas possuem problemas com a não linearidade dos dados de entrada perante os resultados. Já os métodos globais (Monte Carlo) todas as variáveis são alteradas simultaneamente. Na análise de incerteza foram selecionados parâmetros mais sensíveis relativos a um aspecto do desempenho. Para o resfriamento anual tais parâmetros são: taxa de infiltração, dimensões das salas, condutividade do chão, dimensão das janelas de vidro, equipamentos, condutividade do solo, filme do vidro, condutividade da parede, espessura da parede e coeficiente de transferência térmica (U) do vidro.

Yin *et al.* (2009), desenvolveram modelos computacionais com os dados retirados de campo para vários edifícios na Califórnia, buscando análises energéticas. O modelo inicial foi calibrado com dados reais de energia. Verificou-se que a quantidade e a precisão dos dados catalogados em campo como: densidades e horários de funcionamento da iluminação, ocupação, características do sistema de climatização e a forma de operação dos edifícios, tem um impacto direto sobre a precisão dos resultados da simulação. Para cada modelo de simulação inicial, a diferença absoluta e a relativa entre os resultados da simulação e os dados medidos pelas contas de energia foram encontrados. Na comparação dos resultados da simulação com os dados medidos, faz-se necessário, além da maneira gráfica, o uso de métodos estatísticos para determinar a precisão dos resultados, ou seja, foi utilizado o MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*). Após as análises energéticas foi observada uma redução da demanda elétrica dos edifícios entre 15 e 30%.

Lamberts *et al.* (2010), em uma calibração termoenergética, optaram por fazer a comparação de dados de medições da temperatura média de uma casa

com dados obtidos por simulação. Foram definidas duas semanas de monitoramento da temperatura do ar no interior de alguns ambientes desta casa, em dois diferentes meses: dezembro de 2007 e janeiro de 2008. Nesses períodos, as condições de ocupação e manipulação das aberturas foram controladas. Os ambientes utilizados foram: sala, banheiro e quarto de casal. Para as simulações visando à calibração foi utilizado um arquivo climático com dados da cidade de Florianópolis medidos na estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Na utilização do *EnergyPlus*, foi necessário à definição de zonas térmicas do modelo. Foram realizadas várias simulações com o mesmo modelo, modificando apenas alguns parâmetros e comparando seus resultados com as medições efetuadas previamente na casa. A cada simulação, um novo parâmetro foi alterado, sendo que, quando resultado convergia para a precisão em relação às medições, a alteração era mantida nas simulações seguintes. Com o modelo calibrado foi possível verificar entre outras análises o desempenho térmico do edifício através de simulações com diferentes opções de ventilação e a comparação do comportamento dos diferentes tipos de cobertura existentes.

Segundo Leite (2010), o quantitativo de uma medida de eficiência energética não é conhecido pelos interessados devido à falta de aplicação de técnicas adequadas de Medição & Verificação. Desta forma, dados confiáveis de redução de energia são raramente obtidos, deixando a determinação da economia aberta para uma estimativa pessoal. O autor relata que na determinação da economia de energia entre o período de referência e o período *pós-retrofit* deve-se aplicar os ajustes necessários para a comparação correta, pois o cálculo pode envolver mudanças em diversas variáveis independentes. De acordo com o autor, a ausência até o ano de 2002, de metodologia para cálculo de energia economizada em projetos de eficiência energética foi preenchida com a publicação neste ano do guia ASHRAE 14 (2002). Cinco anos mais tarde grande parte das informações contidas no IPMVP faz referência a este guia da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*).

Segundo Martins *et al.* (2010), o principal método reconhecido pelos metrologistas para a avaliação da incerteza de medição é o Guia para a expressão da Incerteza de Medição (Guia ISO). Entretanto, devido a algumas limitações do

método proposto pelo Guia ISO, existem alguns métodos suplementares. O Guia ISO classifica as incertezas obtidas a partir das distribuições de frequência como incertezas do “Tipo A” e as oriundas a partir de função de densidade de probabilidade como incertezas do “Tipo B”. Por consequência, as incertezas padrão das grandezas de entrada, segundo o Guia ISO, são estimadas pela combinação das incertezas padrão do Tipo A e do Tipo B.

De acordo com Eisenhower (2011), há constante aumento na sofisticação do programas de simulação energética e consequentemente elevação das variáveis de entrada e incertezas das respostas. O autor relata que alguns esforços do passado para realizar a análise de sensibilidade e incerteza concentraram-se em poucos parâmetros, enquanto em seu estudo buscou a influência de cerca de 1.000 parâmetros. A análise de incerteza (UA) verificou a confiabilidade dos resultados do modelo em função dos dados de entrada. Numerosos modelos foram gerados e simulados para determinar as saídas mais significativas. Dependendo do intervalo de incerteza de cada parâmetro, o número de parâmetros, e a precisão requerida, inúmeras simulações foram necessárias. Alguns métodos podem ser utilizados para encontrar os dados necessários visando à análise da incerteza, entre eles os métodos de Monte Carlo e o *Latin hypercube sampling* (LHS). Os autores relatam que a utilização de poucas amostras e dados pode ser suficiente para alguns estudos conceituais. Deve-se optar para a análise estatística o tipo de distribuição (normal, uniforme, logarítmica, etc.) que melhor represente os dados de saída. Há várias linhas de análise de sensibilidade, que diferem em sua complexidade e precisão. Um deles é a triagem que investiga valores extremos dos parâmetros e identifica rapidamente como elas influenciam a saída, classificando-os em ordem de importância, ou seja, mais sensíveis a variação dos resultados. No estudo de caso, foram realizadas simulações termoenergéticas em um prédio de 6430 m<sup>2</sup> de propriedade da estação naval Great Lakes - EUA. Na análise de sensibilidade foi selecionado como incertos quase todos os parâmetros numéricos de entrada do *EnergyPlus*, exceto os parâmetros de arquitetura (tamanho, forma e orientação do edifício), bem como os parâmetros relacionados com os coeficientes de curva de desempenho do equipamento. Ao total 1.009 parâmetros de entrada foram variados 10 e 20% de seu valor nominal. Todos esses parâmetros foram alterados simultaneamente, sendo selecionadas as saídas como o consumo de energia e

demanda elétrica para análise das incertezas dos resultados do modelo computacional.

### 3 ESTUDO DE CASO

A análise foi realizada no edifício comercial de propriedade do Centro Internacional de Tecnologia de Software – CITS, na cidade de Curitiba – PR, conforme ilustrado pela figura 3.1.

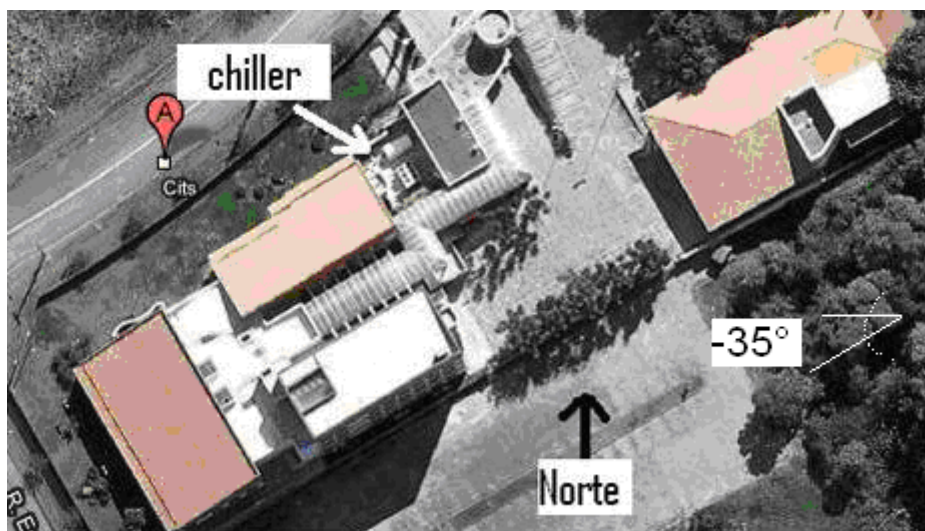


Fig. 3.1. Foto aérea do CITS – fonte Google – 23.11.2010.

A orientação geográfica do edifício foi estimada, baseado na figura 3.1, com o resultado de  $-35^\circ$  negativos em relação a linha imaginária leste-oeste (paralelos).

#### 3.1 Caracterização da Edificação

O conjunto é composto por um prédio de 3 pavimentos e mezanino com aproximadamente  $3.000 \text{ m}^2$  de área útil e um prédio de um único pavimento de aproximadamente  $500 \text{ m}^2$  de área construída. Em geral não existe sombreamento por parte de outros edifícios vizinhos. Somente na área administrativa (prédio menor) verifica-se a presença de árvores ao redor da construção. As paredes são de alvenaria típica (reboco/tijolo/reboco) e os vidros são em geral lisos transparentes e de espessura de 3,0 mm. Quatro salas do primeiro e três salas do segundo pavimento além do prédio administrativo são atendidas por um sistema de climatização à água cuja capacidade do *chiller* é de 60 TR, e as demais salas e pavimentos existentes são atendidas por outro sistema à água com *chiller* de 45 TR além de climatizadores individuais do tipo janela ou *split*.

A tabela 3.1 demonstra os materiais utilizados na edificação por componente construtivo.

Tabela 3.1. – especificação dos materiais da edificação

| Componentes construtivos   | Materiais utilizados                      |
|----------------------------|-------------------------------------------|
| Paredes                    | Argamassa de emboço de 2,5cm de espessura |
|                            | Tijolo com 10 cm de espessura             |
|                            | Argamassa de emboço de 2,5cm de espessura |
| Cobertura                  | Telha de fibrocimento                     |
|                            | Telha cerâmica                            |
| Piso                       | Concreto com 10 cm de espessura           |
| Laje                       | Concreto com 10 cm de espessura           |
| Portas                     | Madeira com 3 cm de espessura             |
| Janelas                    | Vidros comuns lisos com 3 cm de espessura |
| Forro (padrão do edifício) | PVC com espessura de 1 cm                 |

A disposição física dos 7 ambientes pertencentes ao prédio principal que são condicionados pelo *chiller* de 60 TR é ilustrada pelas figuras 3.2 e 3.3, ou seja, no primeiro pavimento são mostradas as salas CPD, Siemens Laboratório, Landys Gyr e Manutenção e no segundo pavimento são detalhadas as salas Siemens Interprice, Desenvolvimento de Hardware e P&D Software.



Fig. 3.2. Primeiro Pavimento (Salas CPD, Siemens Laboratório, Landys Gyr e Manutenção)

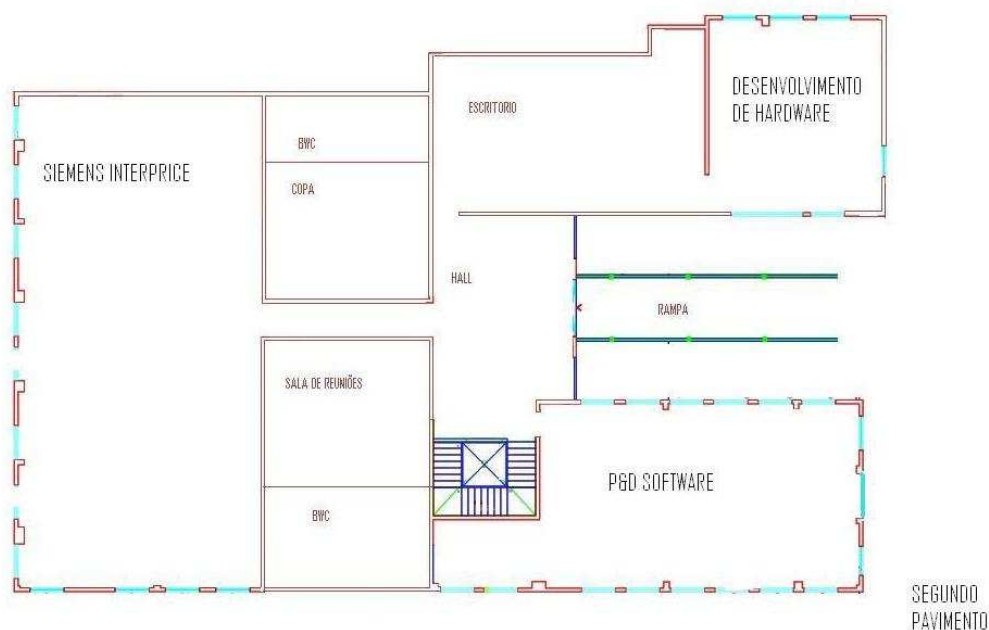


Fig. 3.3. Segundo Pavimento (Salas Siemens Interprice, Desenvolvimento de Hardware e P&D Software)

Os pavimentos superiores não atendidos pelo *chiller* em estudo estão ilustrados pelas figuras 3.4 e 3.5. O terceiro pavimento se resume a uma única grande sala de serviços de informática. Já o quarto pavimento conhecido também como mezanino do terceiro pavimento conta apenas com uma pequena sala.

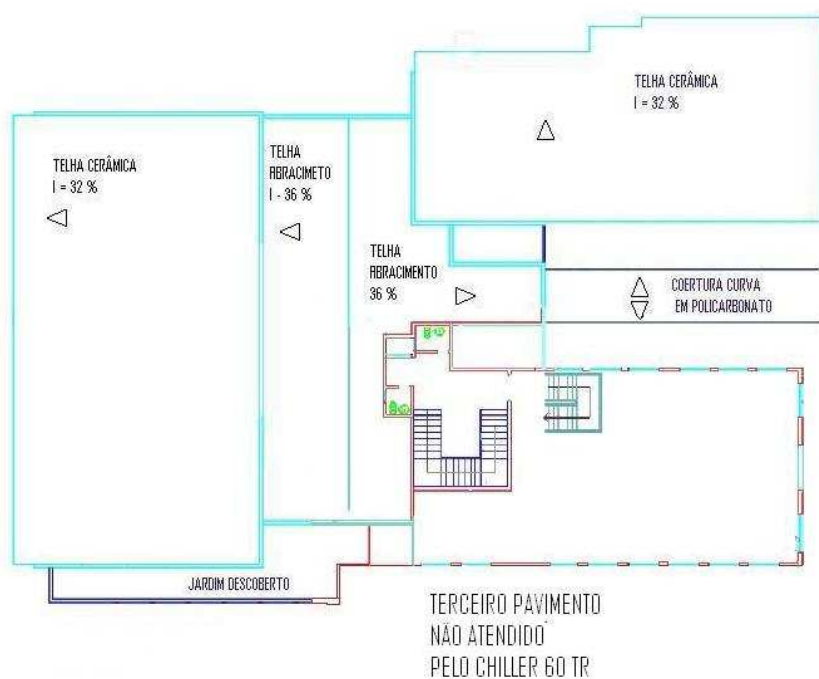


Fig. 3.4. Terceiro Pavimento

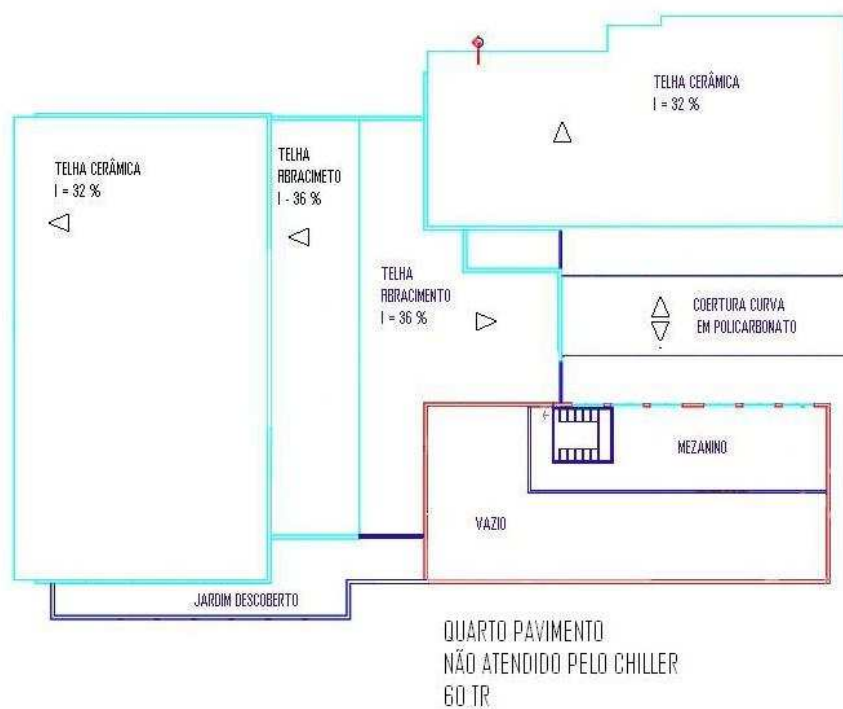


Fig. 3.5. Quarto Pavimento

A figura 3.6 representa a vista frontal do prédio principal e a figura 3.7 ilustra o segundo prédio que contém a sala administrativa e também é climatizado pelo equipamento em estudo.

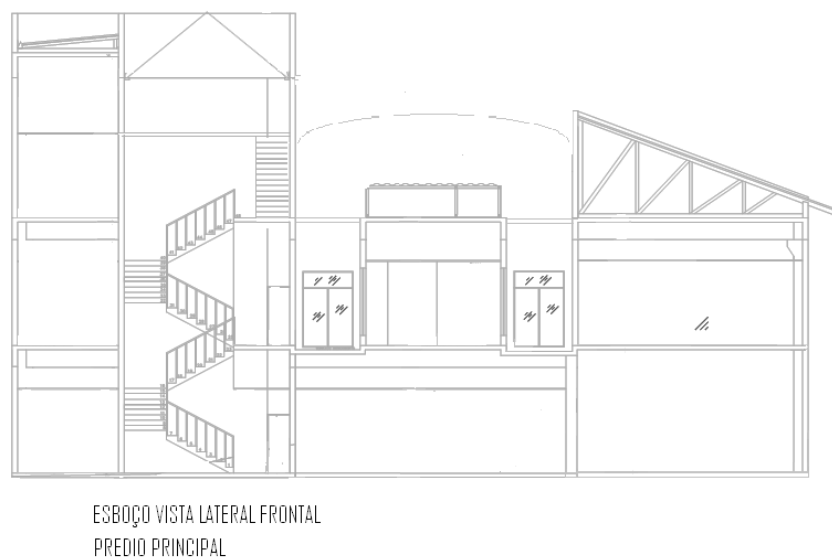


Fig. 3.6. Vista lateral frontal do prédio principal

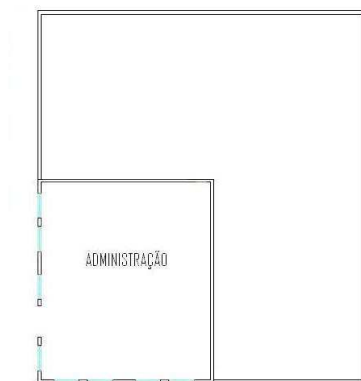


Fig. 3.7. Prédio Administrativo

### 3.2 Sistema de Climatização

O sistema de climatização empregado nas sete salas do prédio principal e na sala da administração é um *chiller* de capacidade 60 TR. A água proveniente do *chiller* é bombeada em um circuito hidráulico até passar pelos *fan-coils* que ficam próximos aos ambientes climatizados. Um esquema básico do sistema está demonstrado na figura 3.8. Os *fan-coils* são dotados de serpentinas onde é realizada a troca de calor com auxílio de ventiladores que fazem a circulação do ar nos ambientes através de dutos e difusores (terminais de insuflamento). Não existe sistema de umidificação ou desumidificação instalado e bancos de resistências para aquecimento não são utilizados.

O sistema apresenta um circuito primário de água gelada composto por pelo *chiller* resfriado a ar e um circuito secundário de distribuição que possuem bombas responsáveis pela circulação da água, além de *fan-coils*, tubulações, válvulas, etc. Os *fan-coils* recebem a água gelada geralmente entre 8 e 10 °C e a devolve para o *chiller* a uma temperatura superior.

O equipamento de condicionamento de ar possui um módulo de controle que permite ao usuário acessar qualquer informação relacionada à configuração, ou seja, modo de operação, temperaturas, dados elétricos, pressões e diagnósticos.

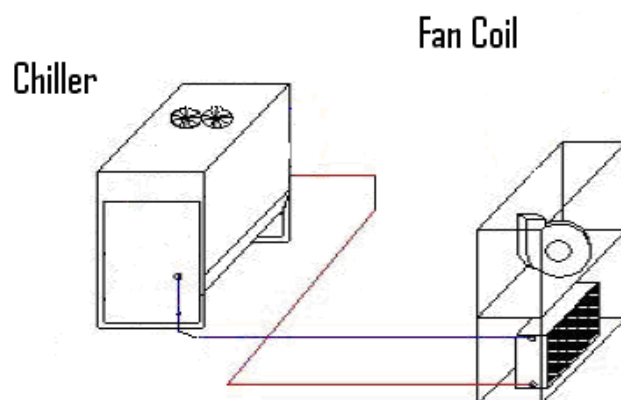


Fig. 3.8. Esquema básico do sistema de condicionamento de ar

### 3.3 Sistema antigo

O *chiller* retirado pelas ações de *retrofit* era um equipamento com 12 anos em operação (fig. 3.9) e capacidade de 60 TR. Os dados de placa estão demonstrados na figura 3.10.



Fig. 3.9 Chiller condensação a ar



Fig. 3.10. Dados de placa do *chiller* antigo com condensação a ar

A circulação da água no sistema é realizada em circuito fechado através de tubulações com isolamento térmica (fig. 3.11).



3.11. Circuito de água do *chiller* (antes da reforma)

Devido à necessidade da circulação da água pelas tubulações do circuito fechado o sistema funciona com o auxílio de 2 bombas centrífugas marca KSB com potência de 12,5 CV (figura 3.12).



3.12. Bombas centrífugas

No interior das salas têm-se os pontos de tomadas de ar necessários à renovação (fig. 3.13) e os difusores (fig. 3.14) necessários ao insuflamento.



Fig. 3.13. Tomadas de ar de retorno



Fig. 3.14. Difusores

Os “*Fan Coils*” responsáveis pelo controle de temperatura no ambiente fazem a movimentação, filtragem e renovação do ar ambiente. São dotadas de válvulas eletromecânicas 3 – 2 vias, permitindo o controle da vazão da água gelada para a troca e calor com o ambiente (fig. 3.15).



Fig. 3.15. Fan Coil

O *chiller* trabalha com o auxílio de 8 equipamentos *fan coils* com as especificações conforme a tabela 3.2

Tabela 3.2 – especificação dos *fan coils*

| EQUIPAMENTO                                    | Quantidade |
|------------------------------------------------|------------|
| CONDICIONADOR FAN-COIL ITS 6TR/4ROWS (BRYANT)  | 3          |
| CONDICIONADOR FAN-COIL ITS 10TR/4ROWS (BRYANT) | 3          |
| CONDICIONADOR FAN-COIL ITS 7TR/4ROWS (BRYANT)  | 2          |

O quadro elétrico de comando e proteção é exclusivo do equipamento (*chiller*) de capacidade de 60 TR (fig. 3.16) e está localizado na sala de força em frente ao *chiller*.



Fig. 3.16. Quadro elétrico principal.

A regulação da temperatura da água (*set-point*) realizada pelo módulo de controle possui a função de manter a saída do circuito da água na faixa de 8 a 10°C (fig.3.17)

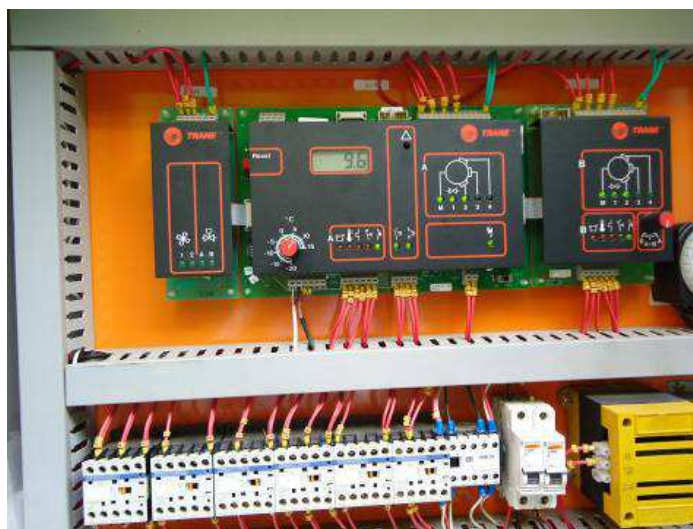


Fig. 3.17. Quadro de Comando do chiller e Set-Point

Os quatro compressores permitem que o sistema trabalhe com cargas parciais em estágios de 25 % da capacidade do equipamento, conforme a leitura de solicitação de carga térmica das salas (fig. 3.18). O evaporador do *chiller* era do tipo tubo como demonstrado na figura 3.19.



Fig. 3.18. Compressores



Fig.3.19. Evaporador tipo "Tube"

A válvula de expansão termostática tem a função de diminuir a pressão através do estrangulamento do líquido refrigerante (fig.3.20).



Fig. 3.20. Válvula de Expansão

No condensador de vapores (fig. 3.21) é gerado um fluxo de ar através de ventiladores instalados na face superior do equipamento facilitando a exaustão de ar (fig. 3.22).



Fig. 3.21. Condensador

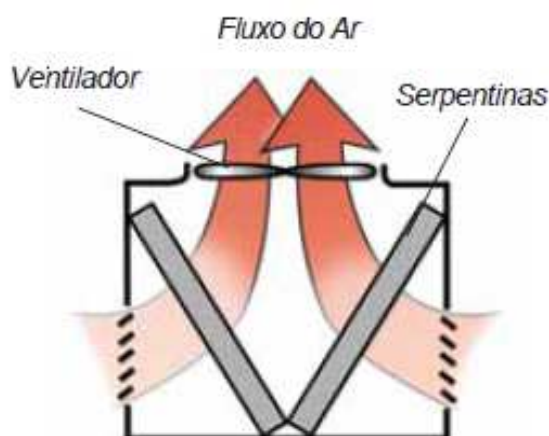


Fig. 3.22. Fluxo de ar no condensador – fonte Trane (2009)

### 3.4 Equipamento Novo

Para a instalação do novo *chiller* 60 TR (fig. 3.23), toda a infra-estrutura física existente foi reaproveitada, bem como todos os equipamentos do circuito secundário. Os dados de placa do novo equipamento são demonstrados na figura 3.24 e o catálogo do compressor está no anexo I.



Fig. 3.23. Novo Chiller 60 TR

|                                                                                                                             |                                                                                                         |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|  <b>TRANE</b>                              |                                                                                                         |                |
| TRANE DO BRASIL IND.COM.PROD.COND.DE AR LTDA<br>Av. dos Pinheirais 565 - Araucária - PR - Brasil<br><b>CGAD060G3200AT00</b> |                                                                                                         |                |
| MODELO<br>MODEL<br>MODELO                                                                                                   |                       |                |
| NÚMERO DE SÉRIE<br>SERIAL NUMBER<br>NUMERO DE SERIE                                                                         | <b>B0411C0014</b><br> |                |
| TAG                                                                                                                         |                                                                                                         |                |
| DATA DE FABRICAÇÃO                                                                                                          | MANUFACTURING DATE                                                                                      | 4/2011         |
| ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA                                                                                                        | ELECTRICAL RATING                                                                                       | 220V / 60Hz    |
| POTÊNCIA NOMINAL                                                                                                            | POWER CONSUMPTION                                                                                       | 70.6 kW        |
| AMPACIDADE MÍNIMA                                                                                                           | MINIMUM AMPCITY (MCA)                                                                                   | 230 A          |
| CORRENTE DE PARTIDA                                                                                                         | LOCKED ROTOR AMPS                                                                                       | 547 A          |
| MÁX. FUSÍVEL/DISJUNTOR                                                                                                      | MAX. FUSE / BREAKER                                                                                     | 300 A          |
| TIPO DE REFRIGERANTE                                                                                                        | REFRIGERANT TYPE                                                                                        | R22            |
| TIPO DE ÓLEO                                                                                                                | OIL TYPE                                                                                                | TRANE OIL00015 |
| CIRCUITO 1 / CIRCUIT 1                                                                                                      |                                                                                                         |                |
| COMPRESSOR                                                                                                                  | COMPRESSOR / COMPRESOR                                                                                  | 2 x SM185      |
| CARGA REFRIGERANTE                                                                                                          | REFRIGERANT CHARGE / CARGA REFRIGERANTE                                                                 | 27.0 kg        |
| CARGA DE ÓLEO                                                                                                               | OIL CHARGE / CARGA DE ACEITE                                                                            | 12.4 L         |
| MOTOR VENTILADOR                                                                                                            | FAN MOTOR / MOTOR VENTILADOR                                                                            | 3 x 1.5HP      |
| CIRCUITO 2 / CIRCUIT 2                                                                                                      |                                                                                                         |                |
| COMPRESSOR                                                                                                                  | COMPRESSOR / COMPRESOR                                                                                  | 2 x SM185      |
| CARGA REFRIGERANTE                                                                                                          | REFRIGERANT CHARGE / CARGA REFRIGERANTE                                                                 | 27.0 kg        |
| CARGA DE ÓLEO                                                                                                               | OIL CHARGE / CARGA DE ACEITE                                                                            | 12.4 L         |
| MOTOR VENTILADOR                                                                                                            | FAN MOTOR / MOTOR VENTILADOR                                                                            | 3 x 1.5HP      |
| PRESSÃO DE TESTE                                                                                                            | TEST PRESSURE                                                                                           | 250/450 PSI    |
| PESO                                                                                                                        | WEIGHT                                                                                                  | 2360 kg        |
|                                                                                                                             | PESO                                                                                                    |                |

Fig. 3.24. Dados de Placa

Da mesma forma que o equipamento antigo, o *chiller* novo é dotado de quatro compressores que permitem que o sistema trabalhe com cargas parciais em estágios de 25 % da capacidade (fig. 3.25). O evaporador do *chiller* também é do tipo tubo como demonstrado na figura 3.26.



Fig. 3.25. Compressores



Fig. 3.26. Evaporador "Tube"

A circulação da água no sistema é realizada pelo mesmo circuito fechado existente através de tubulações com nova isolamento térmica (fig. 3.27).



Fig. 3.27. Circulação de água – sistema reformado

O condensador de vapores (fig. 3.28) gera um fluxo de ar através de ventiladores da mesma forma que o antigo sistema (fig. 3.29). A válvula de expansão termostática que diminui a pressão está demonstrada na figura 3.30.



Fig. 3.28. Condensador



Fig. 3.29. Ventiladores



Fig. 3.30. Válvula de Expansão

### 3.5 Levantamento

O levantamento em campo teve o objetivo de catalogar dados referentes aos prédios do CITS (figuras 3.31 e 3.32) necessários para a modelagem e a sua calibração.

Conforme já mencionado anteriormente, o *chiller* de 60 de TR é responsável pela climatização de 8 salas. As demais salas existentes no edifício são climatizadas por condicionadores de ar janelas, *split* e pelo outro sistema central à água que não fazem parte deste estudo. O sistema de climatização em estudo irá atender no futuro mais duas salas de escritórios do prédio principal, uma em construção e a outra em reforma, assim esses ambientes não foram levados em consideração nos levantamentos e análises, pois não havia influência direta no consumo de energia do sistema de climatização.



Fig. 3.31. Prédio Principal



Fig. 3.32. Prédio Administrativo

### 3.5.1. Sala de Desenvolvimento de Hardware

A sala está localizada no segundo pavimento (1º andar) do CITS (figura 3.33) e tem 95 m<sup>2</sup> de área. Possui 7 janelas, 9 difusores de ar e uma porta convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de poliestireno expandido (EPS) e o piso de concreto revestido de *carpet*.



Fig. 3.33. Sala de Desenvolvimento de Hardware

### 3.5.2. Sala P&D Software

A sala Landys Gyr está localizada no primeiro pavimento (térreo) da edificação (figuras 3.34) e tem 170 m<sup>2</sup> de área. Possui 14 janelas, 20 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de EPS e o piso *carpet* sobre o concreto.



Fig. 3.34. Sala P&D Software

### 3.5.3. Sala Siemens Interprice

A sala Siemens Interprice está localizada no segundo pavimento (1º andar) do CITS (figura 3.35) e tem 420 m<sup>2</sup> de área. Possui 12 janelas, 48 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 5,25 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de poliestireno expandido (EPS) e o piso de concreto revestido de carpet. Possui divisórias que divide a sala em duas partes.



Fig. 3.35. Sala Interprice

### 3.5.4. Sala CPD

Esta sala está localizada no primeiro pavimento (térreo) do CITS (figura 3.36) e tem 25 m<sup>2</sup> de área. Possui 2 janelas, 4 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de poliestireno expandido (EPS) e o piso concreto revestido de *carpet*.



Fig. 3.36. Sala do CPD

### 3.5.5. Sala Siemens Laboratório

A sala Siemens Laboratório está localizada no primeiro pavimento (térreo) da edificação (figuras 3.37) e tem 170 m<sup>2</sup> de área. Possui 6 janelas, 10 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de poliestireno expandido (EPS) e o piso de concreto revestido de *carpet*. Possui divisórias que divide a sala em duas partes.



Fig. 3.37. Sala Siemens Laboratório

### 3.5.6. Sala Landys Gyr

A sala Landys Gyr está localizada no primeiro pavimento (térreo) da edificação (figuras 3.38) e tem 33 m<sup>2</sup> de área. Possui uma janela, 3 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro gesso e o piso de concreto.



Fig. 3.38. Sala Landys Gyr

### 3.5.7. Sala da Manutenção

A sala da manutenção está localizada no primeiro pavimento da edificação (figuras 3.39) e possui 18,5 m<sup>2</sup> de área. Nesta sala existe uma janela, 2 difusores de ar e uma porta padrão convencional de 2,1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de EPS e o piso é *carpet* sobre o concreto.

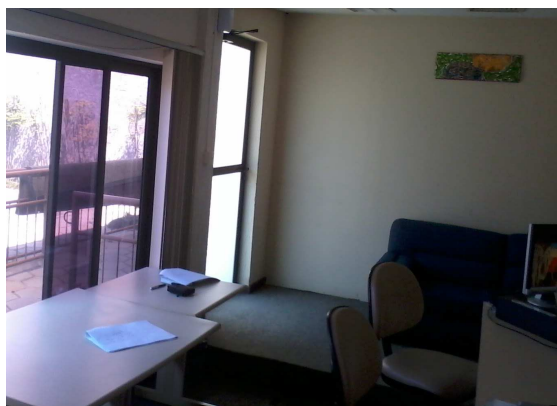


Fig. 3.39. Sala da manutenção

### 3.5.8. Sala da Administração

O prédio Administrativo é separado do prédio central e contém uma grande sala administrativa de 165 m<sup>2</sup> de área dividida por divisórias em 5 pequenas salas, que são atendidas pelo *chiller* em estudo (fig. 3.40). A edificação ainda possui outros ambientes como banheiro e depósitos que são climatizadas individualmente por ar condicionado tipo janela. Na sala administrativa existem 9 janelas, 16 difusores de ar e uma porta de 4 m<sup>2</sup> e outras duas de 2.1 m<sup>2</sup>. As paredes são de alvenaria de espessura de 15 cm com forro de gesso e o piso de concreto.

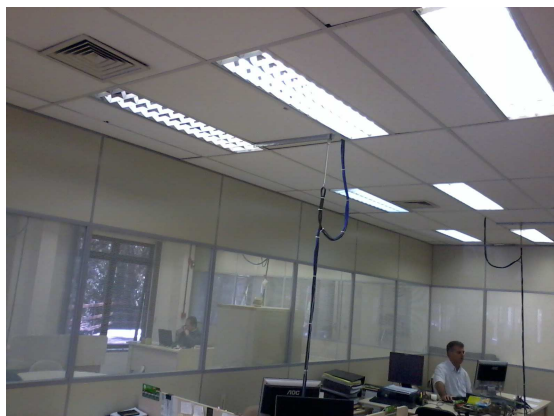


Fig. 3.40. Sala Administrativa

### 3.5.9. Dados consolidados do levantamento

As informações das fontes da carga térmica existente nas salas estão consolidadas na tabela 3.3 e os demais dados consolidados estão demonstrados na tabela 3.4.

**Tabela 3.3. – Fonte de Carga Térmica**

| Ambiente (sala)                           |              | Desenvolvimento de Hardware | P&D Software        | Siemens Interprice  | CPD                 | Siemens Laboratório | Landys Gyr          | Manutenção          | Administração       |
|-------------------------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Andar                                     |              | 1°                          | 1°                  | 1°                  | Térreo              | Térreo              | Térreo              | Térreo              | Prédio externo      |
| Regime de funcionamento                   |              | 8:00 as 18:00 horas         | 8:00 as 18:00 horas | 8:00 as 18:00 horas | 8:00 as 10:00 horas | 8:00 as 18:00 horas | 8:00 as 18:00 horas | 8:00 as 18:00 horas | 8:00 as 18:00 horas |
| Sistema de Iluminação                     |              |                             |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lâmpadas                                  | Modelo       | Fluorescente                | Fluorescente        | Fluorescente        | Fluorescente        | Fluorescente        | Fluorescente        | Fluorescente        | Fluorescente        |
|                                           | Quantidade   | 40                          | 60                  | 144                 | 8                   | 52                  | 12                  | 8                   | 72                  |
|                                           | Potência (W) | 32                          | 32                  | 32                  | 32                  | 32                  | 32                  | 32                  | 32                  |
| Eficiência Iluminação (W/m <sup>2</sup> ) |              | 13.47                       | 11.29               | 10.97               | 10.24               | 9.79                | 11.64               | 13.84               | 13.96               |
| Equipamentos                              |              |                             |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Computadores                              | Modelo       | Desk Top                    | Desk Top            | Desk Top            | Desk Top            | Desk Top            | Lep Top             | Desk Top            | Desk Top            |
|                                           | Quantidade   | 12                          | 18                  | 42                  | 3                   | 19                  | 4                   | 2                   | 18                  |
|                                           | Potência (W) | 100                         | 100                 | 100                 | 100                 | 100                 | 40                  | 100                 | 100                 |
| Impressora                                | Modelo       | Laser                       | Laser               | Laser               | 0                   | Laser               | Laser               | Laser               | Laser               |
|                                           | Quantidade   | 1                           | 1                   | 1                   | 0                   | 1                   | 1                   | 1                   | 2                   |
|                                           | Potência (W) | 180                         | 180                 | 180                 | 0                   | 180                 | 180                 | 180                 | 180                 |
| Reatores                                  | Modelo       | Eletrônicos                 | Eletrônicos         | Eletrônicos         | Eletrônicos         | Eletrônicos         | Eletrônicos         | Eletrônicos         | Eletrônicos         |
|                                           | Quantidade   | 20                          | 30                  | 72                  | 4                   | 26                  | 6                   | 4                   | 36                  |
|                                           | Potência (W) | 3                           | 3                   | 3                   | 3                   | 3                   | 3                   | 3                   | 3                   |
| Outros                                    | Modelo       | 0                           | 0                   | 0                   | Rack Servidores     | Rack Servidores     | o                   | 0                   | Fax (eventual)      |
|                                           | Quantidade   | 0                           | 0                   | 0                   | 2                   | 6                   | 0                   | 0                   | 2                   |
|                                           | Potência (W) | 0                           | 0                   | 0                   | 1000                | 1000                | 0                   | 0                   | 50                  |
| Potência Total dos Equipamentos (kW)      |              | 1.44                        | 2.07                | 4.60                | 2.31                | 8.16                | 0.36                | 0.39                | 2.37                |

Tabela 3.4. – Dados de levantamento das salas climatizadas

| Ambiente (sala)                                   |                          | Desenvolvimento de Hardware                   | P&D Software                  | Siemens Interprice             | CPD                           | Siemens Laboratório            | Landys Gyr                    | Manutenção                    | Administração                                         |
|---------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Andar                                             |                          | 1°                                            | 1°                            | 1°                             | Térreo                        | Térreo                         | Térreo                        | Térreo                        | Prédio externo                                        |
| Dimensões Sala                                    | Comprimento (m)          | 10                                            | 17                            | 30                             | 5                             | 17                             | 10                            | 5                             | 15                                                    |
|                                                   | Largura (m)              | 9.5                                           | 10                            | 14                             | 5                             | 10                             | 3.3                           | 3.7                           | 11                                                    |
|                                                   | Area (m <sup>2</sup> )   | 95                                            | 170                           | 420                            | 25                            | 170                            | 33                            | 18.5                          | 165                                                   |
|                                                   | Altura (m)               | 3                                             | 3                             | 3                              | 3                             | 3                              | 3                             | 3                             | 3                                                     |
|                                                   | Volume (m <sup>3</sup> ) | 285                                           | 510                           | 1260                           | 75                            | 510                            | 99                            | 55.5                          | 495                                                   |
| Janelas                                           |                          | vidro (3 mm)                                  | vidro (3 mm)                  | vidro (3 mm)                   | vidro (3 mm)                  | vidro (3 mm)                   | vidro (3 mm)                  | vidro (3 mm)                  | vidro (3 mm)                                          |
| Face                                              | Noroeste                 | 3                                             | 6                             | 0                              | 0                             | 0                              | 1                             | 0                             | 4                                                     |
|                                                   | Nordeste                 | 1                                             | 2                             | 0                              | 0                             | 1                              | 0                             | 0                             | 0                                                     |
|                                                   | Sudeste                  | 3                                             | 0                             | 3                              | 2                             | 5                              | 0                             | 2                             | 5                                                     |
|                                                   | Sudoste                  | 0                                             | 6                             | 9                              | 0                             | 0                              | 0                             | 0                             | 0                                                     |
| Dimensões                                         | Largura (m)              | 2.1                                           | 2.1                           | 2.1                            | 2.1                           | 2.1                            | 2.1                           | 2.1                           | 2.5                                                   |
|                                                   | Altura (m)               | 1.0                                           | 1.0                           | 1.0                            | 1.0                           | 1.0                            | 1.0                           | 1.0                           | 1.5                                                   |
| Isolação                                          |                          |                                               |                               |                                |                               |                                |                               |                               |                                                       |
| Face                                              | Noroeste                 | sim                                           | sim                           | sim                            | não                           | não                            | não                           | não                           | sim                                                   |
|                                                   | Nordeste                 | sim                                           | sim                           | não                            | sim                           | sim                            | não                           | não                           | sim                                                   |
|                                                   | Sudeste                  | sim                                           | sim                           | não                            | não                           | sim                            | não                           | sim                           | sim                                                   |
|                                                   | Sudoste                  | não                                           | não                           | não                            | não                           | não                            | não                           | não                           | não                                                   |
| Difusores (0.35 x 0.35 m)                         |                          | 9                                             | 20                            | 48                             | 4                             | 10                             | 3                             | 2                             | 16                                                    |
| Paredes                                           |                          |                                               |                               |                                |                               |                                |                               |                               |                                                       |
| Material (espessura)                              | Reboco (cm)              | 2.5                                           | 2.5                           | 2.5                            | 2.5                           | 2.5                            | 2.5                           | 2.5                           | 2.5                                                   |
|                                                   | Tijolo (cm)              | 10.0                                          | 10.0                          | 10.0                           | 10.0                          | 10.0                           | 10.0                          | 10.0                          | 10.0                                                  |
|                                                   | Reboco (cm)              | 2.5                                           | 2.5                           | 2.5                            | 2.5                           | 2.5                            | 2.5                           | 2.5                           | 2.5                                                   |
| Forro                                             |                          | EPS                                           | EPS                           | EPS                            | EPS                           | EPS                            | gesso                         | gesso                         | EPS                                                   |
| Divisórias Eucatex                                |                          | Sala da gerência nas dimensões de 2,5 x 2,5 m | Não possui                    | Corta o ambiente em duas salas | Não possui                    | Corta o ambiente em duas salas | Não possui                    | Não possui                    | Divide o ambiente em 5 salas                          |
| Piso                                              |                          | Concreto com carpet                           | Concreto com carpet           | Concreto com carpet            | Concreto com carpet           | Concreto com carpet            | Concreto                      | Concreto com carpet           | Concreto com madeira 7 mm                             |
| Portas (Madeira)                                  |                          | uma - área 2.1 m <sup>2</sup>                 | uma - área 2.1 m <sup>2</sup> | uma - área 5.2 m <sup>2</sup>  | uma - área 2.1 m <sup>2</sup> | uma - área 2.1 m <sup>2</sup>  | uma - área 2.1 m <sup>2</sup> | uma - área 2.1 m <sup>2</sup> | uma - área 4 m <sup>2</sup> e 2 de 2.1 m <sup>2</sup> |
| Ocupação (pessoas) com baixa atividade metabólica |                          | 12.0                                          | 18.0                          | 45.0                           | 1.0                           | 15.0                           | 1.0                           | 1.0                           | 18.0                                                  |

### 3.6 Medições Reais de Energia

As medições de consumo de energia e demanda elétrica, nos dois *chillers* (antigo e novo) como também de temperatura interna na sala Interprice (durante as medições de energia do equipamento novo) foram realizadas por equipamentos específicos com os seguintes objetivos:

1. Auxiliar a calibração do modelo computacional utilizando medições de campo do consumo de energia do novo *chiller* e de temperatura real em uma sala.
2. Encontrar a demanda máxima do *chiller* antigo a fim de obter o valor da eficiência (kW/TR) com o objetivo de simular no modelo computacional a condição “antes” através da equação 2. Essa informação é necessária para obter a economia de energia proporcionada pelo *retrofit*.

Na medição de campo da energia elétrica foi utilizado o analisador de grandezas (fig 3.41) marca Circutor, modelo AR-5, sendo os dados obtidos somente referentes ao equipamento *chiller*. Na medição de temperatura foi utilizado o medidor de grandezas da marca CIBER/LUMEL, fabricante CIBER.

Não houve medições por instrumentos nas bombas ou *fan coils* do sistema, pois somente o *chiller* foi substituído na ação de *retrofit* e, por isso, avaliado.



Fig. 3.41. Analisador de Energia

### 3.6.1 Dados Medidos - *chiller* novo

Através da instalação do analisador de energia com memória de massa no quadro elétrico do novo *chiller* (fig. 3.41) foi possível obter dados referentes às grandezas elétricas de demanda e consumo de energia. Os dados foram registrados a cada 30 segundos no período compreendido entre as 12 horas do dia 28/09/2011 e as 12 horas do dia 30/09/2011. A maior demanda elétrica do *chiller* requerida pelo sistema foi de 32 kW, conforme pode ser visualiado pela figura 3.42.

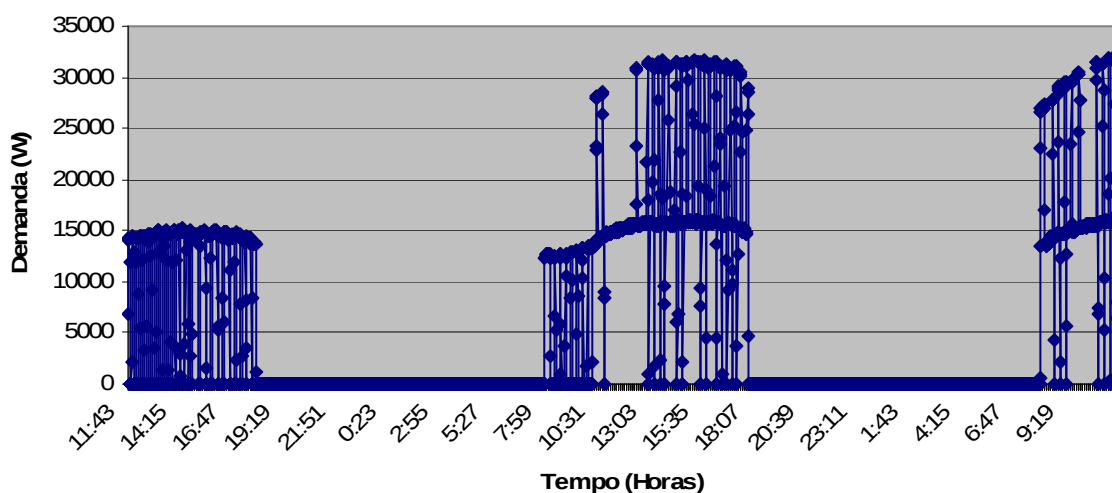


Fig. 3.42 Demanda elétrica ativa

O consumo de energia elétrica foi monitorado no período de 48 horas e resultou aproximadamente em 270 kWh de energia acumulada conforme pode ser observado pela figura 3.43. A figura mostra patamares que representam o período noturno em que o equipamento permaneceu desligado.

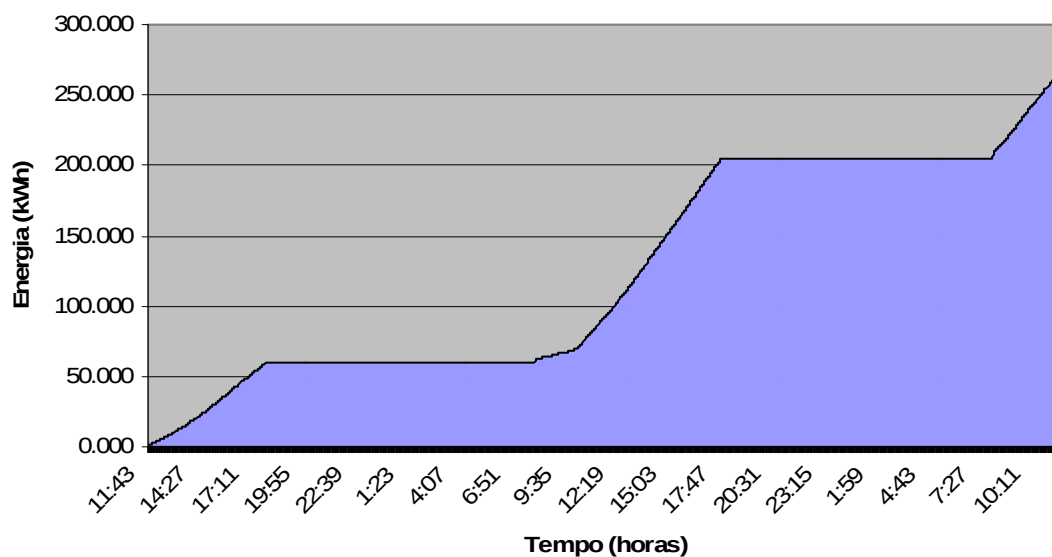


Fig. 3.43. Consumo de Energia Elétrica

O medidor de temperatura com memória de massa foi instalado no interior da sala Interprice, por ser a maior sala em estudo e que abriga a maior quantidade de pessoas. A figura 3.44 representa a temperatura do ar monitorada no período de 48 horas.

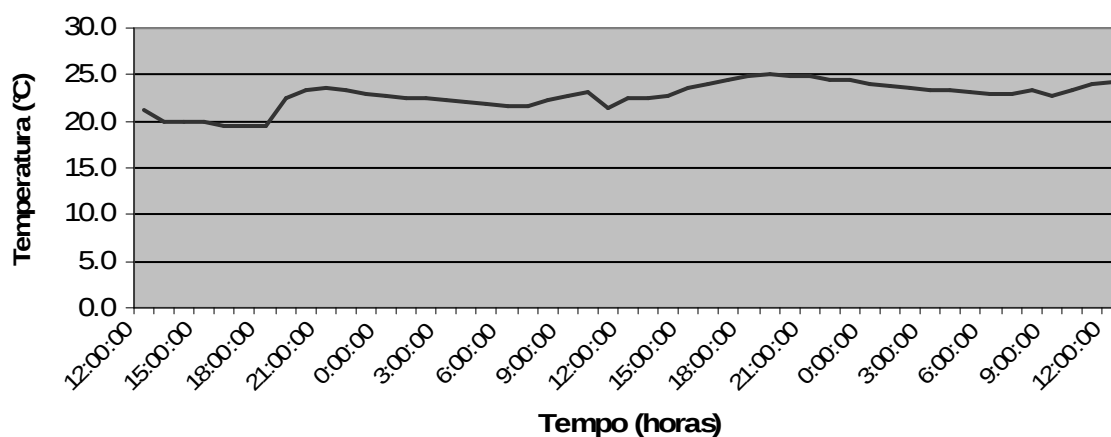


Fig. 3.44. Temperatura medida na sala Interprice

A temperatura nas demais salas do edifício foi verificada eventualmente por termômetros portáteis existentes no local somente para simples aferição e permaneceu entre os valores de 20 e 25 °C, estando dentro do critério de conforto térmico desejado pelos ocupantes (figuras 3.45).



Figura 3.45. monitoramento de temperatura da sala da manutenção

A eficiência do chiller novo (1,141 kW/TR ou 3 W/W com 100 % da carga) e suas demais características foram retiradas dos dados de placa bem como do catálogo do fabricante.

### 3.6.2 Dados coletados – *chiller* antigo

A grandeza elétrica de demanda elétrica foi monitorada a cada 30 segundos entre as 12 horas do dia 10/03/2011 e às 12 horas do dia 11/03/2011 com integralização a cada 15 minutos. A maior demanda elétrica foi de 91 kW (figura 3.46) e ocorreu às 16 horas e 15 minutos. Verificou-se no local que os 4 compressores permaneceram em funcionamento no momento de demanda máxima. Durante o período da monitoração o equipamento permaneceu ligado no período noturno.

A potência elétrica máxima do *chiller* de acordo com os dados de placa é de 86 kW, pouco inferior ao valor medido.

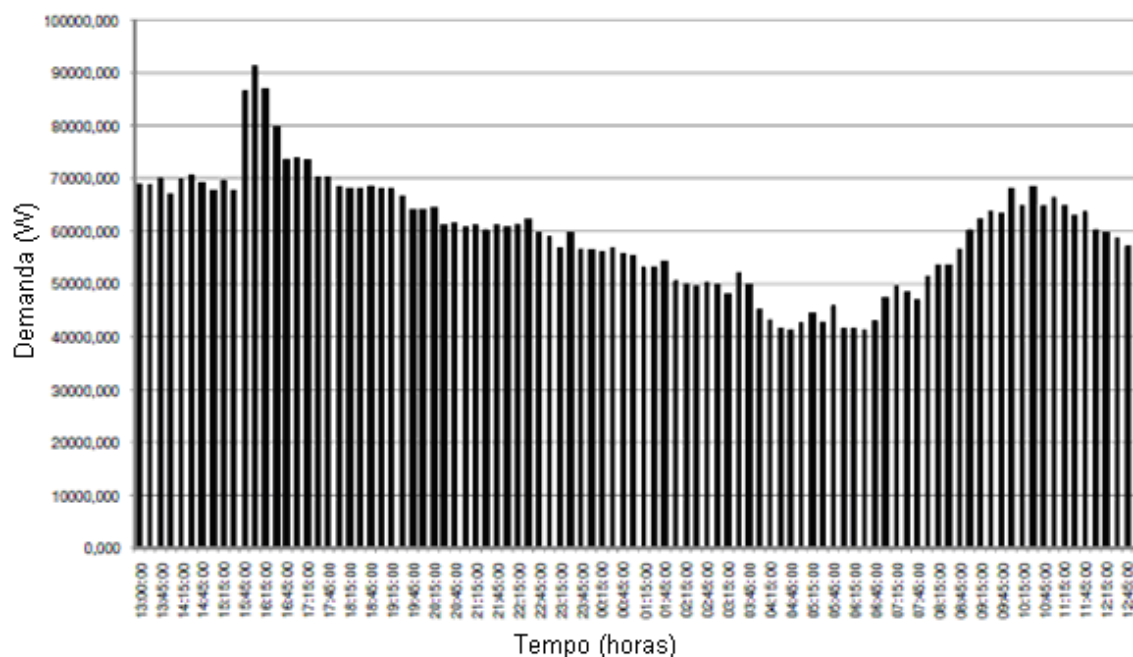


Fig. 3.46 Demanda Ativa (W)

Após 12 anos de uso a eficiência do *chiller* retirado de operação, pode ter sido alterada em relação as suas características nominais (iniciais). Sendo assim buscou-se calcular a sua eficiência com base na sua maior demanda elétrica e sua capacidade de refrigeração (equação 5). Isso também foi necessário devido à ausência de catálogos.

- o Eficiência (100 % da carga)= (Demanda / Capacidade) kW/TR (5)
- o Eficiência= (91 kW / 60 TR)
- o Eficiência equipamento antigo= 1,517 kW/TR
- o COP = 2.2 W/W

### 3.6.3 Observações referentes às medições de campo

Na análise comparativa das figuras 3.42 e 3.46 (gráficos de demanda) não se permite obter a redução de demanda pela implementação do *retrofit*, visto que as características dos dois períodos de medição (antes e após o *retrofit* do *chiller*) são totalmente diferentes (verão e inverno), além da diferença do regime de funcionamento do período noturno.

Como é impossível possuir os dois *chiller* (antigo e o novo) fisicamente instalados no mesmo instante a fim de comparar seus desempenhos e obter os

valores de economia desejados, a simulação energética aparece como uma ferramenta alternativa para esta aplicação, permitindo a comparação dos dois equipamentos em uma mesma base de característica.

#### 3.6.4 Plano de Medição e Verificação - PMV

Dentro da metodologia proposta pelo IPMVP deve ser gerado um PMV na aplicação de qualquer um das opções A, B, C ou D que tem como objetivo demonstrar que a M&V será realizada de maneira consistente e lógica, assegurando o rastreamento das informações. Para isso é necessário planejar todas as etapas e propor considerações pertinentes ao trabalho, objetivando assim a obtenção de valores de medições confiáveis e de metodologia reprodutível.

Quando aplicada a opção D do IPMVP deve-se tomar atenção aos seguintes itens adicionais em relação às outras opções a serem registrados:

- registrar o nome e o número da versão do software de simulação a ser utilizado;
- gerar cópia dos arquivos dos dados de entrada, saída e climáticos usados para a simulação;
- anotar quais os parâmetros de entrada que foram medidos e quais os que foram estimados.

Não haverá apresentação do PMV elaborado neste trabalho. Considerou-se que os dados pertinentes já estão descritos ao longo do texto.

#### 4. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Marques (2009) define que a Medição e Verificação têm como grande objetivo determinar com fidelidade a economia de energia, por esta razão é exigível que os relatórios de economia tenham um nível de incerteza adequado. Para que o resultado de economia de energia possa ser estatisticamente válido, esta deve ser expressa com a sua precisão em conjunto com os seus intervalos de confiança.

Segundo o M&V Guidelines (2008), a incerteza no nível do projeto pode ser dividida em quatro tipos gerais: amostragem, estimativas, modelagem e medições. Os projetos muitas vezes não contêm um ou mais dos quatro componentes, no entanto, em um projeto hipotético que contém todos os quatro componentes, a incerteza total do projeto seria calculada tomando a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada membro de incerteza, como demonstra a equação 6:

$$incerteza\_proj = \sqrt{(Incert\_amost)^2 + (Incert\_estimat)^2 + (Incert\_mod)^2 + (Incert\_med)^2} \quad (6)$$

O M&V Guidelines (2008) relata que a incerteza é geralmente proporcional à complexidade das medidas aplicadas. Já os erros podem ser introduzidos se um instrumento não for manuseado corretamente ou se for aplicado em condições inadequadas. O gerenciamento de dados também pode introduzir erros através de dados omitidos, ajustados ou ainda perdidos.

O IPMVP (2010) descreve que nos resultados de economia de energia, o nível de incerteza aceitável está relacionado com o custo para a obtenção da incerteza tendo em vista o valor previsto da economia de energia. Os custos médios típicos anuais de M&V são inferiores a 10% da economia média anual a ser avaliada. A quantidade da economia em jogo coloca, portanto, um limite no orçamento da M&V, que por sua vez determina a margem aceitável de incerteza.

Segundo Lima Junior *et al.* (2011), o conceito de incerteza não depende de se conhecer o valor do mensurando, e é a expressão mais apropriada e universal da qualidade do resultado de uma medição, já o erro é a diferença entre o valor obtido no processo de medição e o valor verdadeiro do mensurando definido. Para um melhor entendimento do capítulo a tabela 4.1 compara e determina as diferenças entre os conceitos de erro e incerteza.

Tabela 4.1- Comparação entre conceitos de erro e de incerteza (fonte: Lima Junior *et al.*- 2011)

|                                         | <b>Erro</b>                                                                                                                    | <b>Incerteza</b>                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Definição                               | É a diferença entre o resultado obtido em uma medição e seu valor verdadeiro.                                                  | É um parâmetro que permite avaliar quantitativamente a confiabilidade do resultado de uma medição.                                                                                                               |
| Forma de obter                          | O erro é obtido pela diferença entre o resultado da medição e o seu valor verdadeiro. Portanto, pode ser positivo ou negativo. | A incerteza pode ser obtida por procedimentos estatísticos ou não, mas sempre poderá ser interpretada como um desvio padrão.                                                                                     |
| Necessidade de saber o valor verdadeiro | É necessário saber (ou ter uma boa estimativa) do valor verdadeiro para estimar o erro de uma medida.                          | Não é necessário saber o valor verdadeiro para estimar a incerteza do resultado de uma medição.                                                                                                                  |
| Decomposição                            | O erro se decompõe linearmente nas diversas fontes de erro:<br>Erro total= erro fonte 1 + erro fonte 2 + ...                   | O quadrado da incerteza total se decompõe em uma soma de quadrados, caso as incertezas parciais sejam estatisticamente independentes:<br>$\text{incert total}^2 = \text{incert 1}^2 + \text{incert 2}^2 + \dots$ |

De acordo com Gomes (2001), erro é definido como a diferença entre um resultado individual e o seu valor verdadeiro, já a incerteza, se retrata como uma gama de valores. A incerteza total, denominada de incerteza padrão combinada é expressa pelo desvio padrão estimado e obtida pela combinação de todas as componentes da incerteza através da lei de propagação da incerteza. A incerteza expandida representa um intervalo dentro do qual se crê encontrar-se o valor do mensurando, com um maior grau de confiança. A incerteza *expandida* é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada por um fator de expansão  $k$  que

é baseada no grau de confiança desejado. Para um grau de confiança de aproximadamente 95%  $k$  é igual a 2.

Optou-se para o trabalho estabelecer  $k=2$  seguindo a curva de distribuição normal, Poderia também expandir a análise para a distribuição *t-Student* onde o valor do fator  $k$  poderia assumir valores entre 2 e 3.

Martins *et al.* (2010) utiliza a análise de Monte Carlo, para a avaliação da incerteza de medição, retirando amostras a partir de função de densidade de probabilidade das grandezas de entrada, propagando esses valores, através do modelo para produzir amostras da grandeza de saída. Dessa forma, é possível obter uma função de probabilidade empírica ou amostral de resultados. Portanto, o resultado esperado da saída é obtido pela média dos valores obtidos e a incerteza padrão associada ao resultado é igual ao desvio padrão.

#### **4.1 Incerteza referente à amostragem**

De acordo com o M&V Guidelines (2008) a incerteza referente à amostragem ocorre quando as medições são efetuadas em uma amostragem dos equipamentos, devido a não ser econômico realizar medições reais em todos os equipamentos que possuam a mesma especificação. A incerteza é calculada a partir do desvio padrão dos resultados das amostras.

No caso em estudo, não haverá erro de amostragem, pois se trata apenas de um equipamento em estudo.

#### **4.2 Incerteza referente às estimativas**

O M&V Guidelines (2008) relata que estimativas têm de ser feitas para completar os cálculos quando alguns dados não estão disponíveis, pois não podem ser medidas diretamente. Quando as estimativas de engenharia são usadas em vez de medições reais, a incerteza é introduzida. Essa incerteza muitas vezes é estimada com base na precisão esperada dos valores estimados.

Para este trabalho, utilizando a opção D do IMPVP é convencionado que todas as incertezas referentes às estimativas refletem-se na análise da incerteza de modelagem.

### 4.3 Incertezas referentes à modelagem

Segundo o M&V Guidelines (2008) a incerteza de modelagem é introduzida quando a economia de energia é calculada usando modelos de engenharia ou simulação (opção D). A precisão de qualquer modelo é baseada na sua capacidade de explicar todas as variações no consumo de energia, empregando as técnicas de análise adequadas, incluindo todas as variáveis relevantes, e excluindo aquelas que são irrelevantes.

De acordo com o IPMVP (2010), a incerteza de modelagem está ligada a incapacidade de o modelo encontrar formas matemáticas que expliquem completamente as variações do consumo de energia.

De acordo com Westphal (2007), a incerteza padrão de medição na predição de uma determinada variável pode ser expressa pelo desvio-padrão ( $\sigma$ ) obtido e a precisão na determinação do  $\sigma$  depende do número de simulações efetuadas e não do número de parâmetros selecionados.

Segundo Marino *et al.* (2008) a análise de sensibilidade (AS) é um método para a quantificação de incerteza em qualquer tipo de modelo complexo. O objetivo da AS é de identificar elementos críticos (parâmetros e condições iniciais) de um modelo e quantificar como a incerteza de entrada impacta no resultado do modelo. A medida de sensibilidade pode ser facilmente calculada numericamente através da realização de várias simulações variando fatores de entrada em torno de um valor nominal. Esta técnica investiga o impacto sobre a saída do modelo, com base em mudanças nos fatores apenas muito próximos dos valores nominais.

Segundo Westphal (2007) a análise diferencial de sensibilidade (ADS) envolve a simulação de sucessiva de casos, variando-se um único dado de entrada por vez, enquanto que os demais parâmetros permanecem com valores constantes. A variação em um resultado é a medida direta da alteração feita no parâmetro de entrada específico. A introdução desse método em um programa de simulação não exige interferência no código do programa. São feitas apenas várias simulações, alterando-se cada parâmetro em um determinado número de vezes, extraíndo-se as respectivas influências nos parâmetros de saída e calculando-se a influência total.

Para o método de Monte Carlo, Westphal (2007) relata que os valores de entrada de todos os parâmetros em análise devem aderir à curva de distribuição

normal. Em cada simulação, um valor é selecionado randomicamente para cada parâmetro, baseado na sua probabilidade de ocorrência. Todos os dados de entrada analisados são variados simultaneamente. Dessa forma, não se pode determinar a influência individual de cada dado de entrada no resultado analisado.

De acordo com Lamberts (2005) a análise de sensibilidade consiste basicamente na variação dos insumos e a conseqüente variação nos resultados. Devem ser reconhecidas entradas que causam variações significativas nas saídas. Através desta análise alguns parâmetros de entrada poderiam ser classificados como sem importância para uma modelo de construção específico e o usuário poderia adotar valores padrão para ele.

A análise de sensibilidade diferencial foi utilizada por Lamberts (2005) durante a simulação energética de uma edificação no programa *EnergyPlus* buscando-se a calibração do modelo. Foram realizadas várias simulações com os ajustes nos fatores de influências verificados pela AS. Através da metodologia, o modelo de um edifício de escritórios foi calibrado com diferença máxima de 20% entre o consumo de energia elétrica mensal estimado e o real, além da diferença de 1% no consumo de energia anual.

Além dos dois métodos apresentados de análise de sensibilidade existem outros métodos disponíveis no meio científico. A análise diferencial de sensibilidade possui a desvantagem de propor uma abordagem linear da influência dos dados de entrada em relação à resposta do modelo. Dessa forma, diferentes valores de entrada para o mesmo parâmetro podem perturbar as respostas de saída de forma não linear.

O IPMVP (2010) considera os valores medidos através do medidor da concessionária como verdadeiros nas análises, pois estes valores são faturados e qualquer economia de energia gerada deve refletir diretamente nestes valores.

Segundo Westphal (2007) ao invés de trabalhar sobre um único valor de consumo anual, o usuário deve-se basear em um intervalo de confiança, obtido pelo cálculo de todas as combinações dos dados de entrada. À medida que as incertezas do modelo são reduzidas, certamente o intervalo de confiança é estreitado. Caso o simulador não tenha condições de efetuar mais ajustes no seu modelo, ele pode estimar a distribuição de resultados prováveis pela simulação a partir de uma amostra de casos. Nessa amostra, apenas os parâmetros realmente significativos deverão ser variados.

Na análise e quantificação das incertezas de um modelo Westphal (2007) gerou pelo método *Latin Hypercube Sampling (LHS)* uma amostragem de 40 casos (amostras simuladas), através da variação aleatória dos dados de entrada para esses parâmetros. Com os resultados das simulações dos 40 casos, Westphal gerou um histograma utilizando a frequência obtida de cada faixa de consumo anual de energia. O gráfico gerado de distribuição de frequências seguiu a distribuição normal, sendo que o valor real de consumo (medido por instrumento) permaneceu na barra central do gráfico. Este método determina uma amostra de possíveis modelos que permitem estimar o consumo anual de energia elétrica da edificação, com uma determinada precisão.

Através da análise estatística baseada na figura 4.1 (curva normal) é possível encontrar a expressão 7, onde  $\sigma$  é o desvio padrão,  $\mu$  é a média da grandeza desejada e o fator  $k$  é igual a 2 para nível de certeza de 95 %.

$$\text{Resultado} = \mu \pm k \sigma. \quad (7)$$

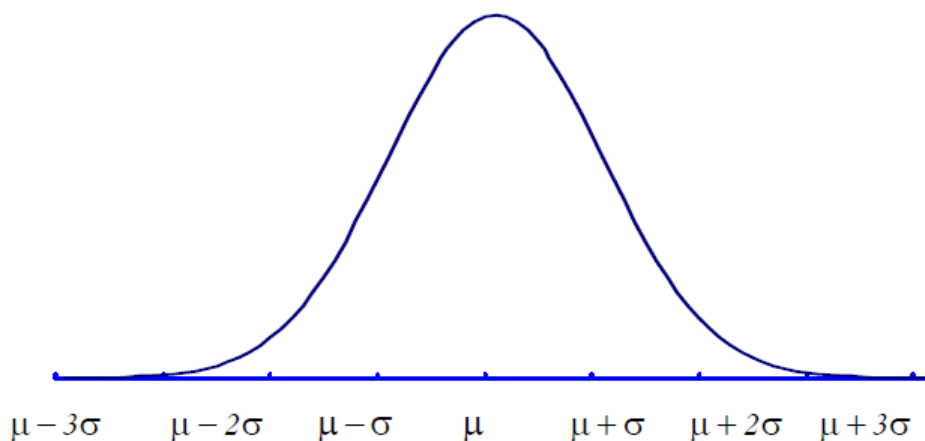


Figura 4.1 – curva de distribuição normal

A quantificação das incertezas de medição referente à modelagem do sistema em estudo é discutida no capítulo 8. A metodologia empregada baseada na análise e observação dos fatos, como também em alguns pontos da estrutura lógica do trabalho de Westphal (2007) e Hopfe (2009) é a seguinte:

- Encontrar as principais variáveis de entrada para o estudo da sensibilidade do modelo com base em observações e sugestões da bibliografia;

- Analisar a sensibilidade do modelo com base na ideologia do método diferencial, ou seja, perturbar a entrada com valores próximos ao nominal e verificar o nível de variação da saída (consumo de energia);
- Com a lista dos parâmetros que realmente geram influência significativa nos resultados, analisar as incertezas de medição;
- Montar histogramas com novas simulações utilizando apenas os parâmetros principais determinados na análise de sensibilidade. As variações nos parâmetros nas novas simulações devem ser as maiores possíveis para a variável, admitindo-se o desconhecimento parcial pelo projetista em relação a este parâmetro de entrada. Dessa forma é possível verificar as máximas variações do modelo computacional em relação aos dados incertos de entrada.
- Realizar uma análise estatística para encontrar a média e o desvio padrão dos resultados das simulações. O gráfico poderá seguir uma distribuição normal, logarítmica, retangular, etc.
- Determinar as incertezas padrão de medição através do desvio padrão.
- Determinar a incerteza expandida da medição para 95 % de certeza com fator  $k=2$ .

#### **4.4 Incerteza referente à medição**

Qualquer grandeza medida inclui algum grau de incerteza. Sabe-se que nenhum instrumento pode ser totalmente preciso, então todas as medições contêm alguma incerteza.

Segundo o M&V Guidelines (2008), a incerteza de medição é devida a imprecisões dos equipamentos de medição. Por exemplo, as especificações para um medidor pode indicar que há uma incerteza de  $\pm 5\%$ , o que significa que qualquer leitura pode ser considerada como seu valor verdadeiro podendo estar em até 5% a mais ou a menos em relação à média do valor medido. Pode existir um erro adicional se um instrumento não for devidamente calibrado ou se for aplicado para o trabalho em condições inadequadas.

Para a análise da incerteza referente à medição do consumo de energia foi verificado o certificado de calibração do equipamento. A incerteza declarada pelo certificado de calibração do medidor com 95 % de certeza é que a incerteza na faixa de grandeza medida da demanda é de 0,2 %.

## 5. MODELAGEM

Um modelo é uma representação de um sistema. Busca reproduzir a realidade de forma indireta, podendo utilizar meios virtuais como o computacional para representar sistemas.

### 5.1. Ferramenta de simulação termoenergética

A ferramenta de simulação escolhida para o desenvolvimento e simulação do modelo foi o *software EnergyPlus* versão 7.1.0.012 (e<sup>+</sup>), que é um programa distribuído gratuitamente na rede mundial de computadores pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

De acordo com o manual do *EnergyPlus* (2012) o programa tem suas raízes nos programas BLAST e DOE-2. Seu público alvo são engenheiros e arquitetos que desejam: dimensionar o equipamento de climatização adequado; desenvolver estudos de *retrofit* para análise do ciclo de vida; otimizar o desempenho energético, entre outras aplicações.

Segundo Batista *et al.* (2005), no programa *EnergyPlus* dispõe-se de diferentes algoritmos de solução do balanço de calor através das superfícies. Em seu trabalho foi utilizada a função de transferência de calor por condução (*Conduction Transfer Function – CTF*). A radiação é calculada automaticamente pelo programa.

Crawley *et al.* (2000), relatam que o método de cálculo das zonas térmicas do *EnergyPlus* se trata de um modelo de balanço de calor no qual o ar ambiente é modelado com temperatura uniforme.

O programa oferece ao usuário inúmeras funções, além de um manual e exemplos de simulações para consulta, o que permite a pesquisa e o desenvolvimento dos projetistas.

A interface do *EnergyPlus* para a comunicação com o usuário, ou seja, o “*IDF Editor*” permite que o projetista tenha acesso a uma infinidade de parametrizações. Muitos valores já possuem suas sugestões (*default*) e outros são obrigatórios os seus lançamentos.

A maior dificuldade na elaboração do código computacional para o modelo do estudo de caso foi gerar a geometria da edificação utilizando a interface *IDF*

*Editor*, pois todas as coordenadas das paredes, tetos, pisos, portas, janelas, forro etc., devem ser lançados manualmente neste software pelo usuário. Quando se trata de simulações para pequenos ambientes, a realização da modelagem da geometria da edificação diretamente no *EnergyPlus* se mostra viável. Porém, em se tratando de edificações com várias zonas térmicas o sistema disponibilizado pelo *software* em questão não atende a necessidade do projetista.

Dessa forma foi necessário buscar um *software* de interface gráfica mais amigável para auxiliar na modelagem da geometria da edificação. O programa computacional escolhido foi o *software Google SketchUp*, pois oferece um conjunto de ferramentas gráficas que tornam a modelagem fácil e preciso. O *Google SketchUp* possui várias funcionalidades, entre elas: importar desenhos do *software Auto Cad*; construção de edifícios através da criação de blocos que são representados num espaço tri-dimensional, gerando facilmente as geometrias necessárias e facilitando a verificação de possíveis erros.

O *Plug-in* utilizado para adicionar as funções do *Google Sketchup* no *EnergyPlus* foi o *Open Studio* que permite unir as capacidades de trabalho de cada programa.

## 5.2. Modelo Computacional

As oito salas de escritório já descritas anteriormente atendidas pelo *chiller* em estudo foram representadas por zonas térmicas no modelo computacional. As outras salas do prédio formaram zonas térmicas extras, a fim somente de compor o restante da edificação.

A Tabela. 5.1 fornece as principais informações dos dados inseridos no modelo utilizando o programa e<sup>+</sup>.

Tabela 5.1. Informações básicas do modelo computacional

| Ambientes                         | Zona (Energy Plus) | Andar   | Densidade da iluminação [W/m <sup>2</sup> ] | Área [m <sup>2</sup> ] | Volume [m <sup>3</sup> ] | Potência instalada dos equipamentos [W] | Ocupação |
|-----------------------------------|--------------------|---------|---------------------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|----------|
| SALA INTERPRICE                   | 5659F2             | 1°      | 14                                          | 420                    | 1260                     | 5880                                    | 45       |
| SALA DE DESENVOLVIMENTO           | 6CFB0C             | 1°      | 14                                          | 95                     | 285                      | 1330                                    | 12       |
| SALA P&D                          | 2BA284             | 1°      | 14                                          | 170                    | 510                      | 2380                                    | 18       |
| SALA CPD                          | F10FA8             | 2°      | 14                                          | 25                     | 75                       | 800                                     | 1        |
| SALA SIEMENS                      | AC0F1A             | 2°      | 14                                          | 170                    | 510                      | 2380                                    | 15       |
| SALAS DE MANUTENÇÃO E SALA LANDYS | BAD860             | 2°      | 14                                          | 51.55                  | 154.65                   | 721.7                                   | 2        |
| SALA DA ADMINISTRAÇÃO             | EE3AFD             | externo | 12                                          | 165                    | 495                      | 1980                                    | 18       |
| Total                             |                    |         |                                             | 1096.55                | 3289.65                  | 15021.7                                 | 111      |

O programa *Google Skteckup* utilizado como interface gráfica para o  $e^+$  teve o objetivo de criar a geometria da edificação. As figuras 5.1 e 5.2 apresentam respectivamente as representações esquemáticas do conjunto arquitetônico e das zonas térmicas criadas para o modelo.

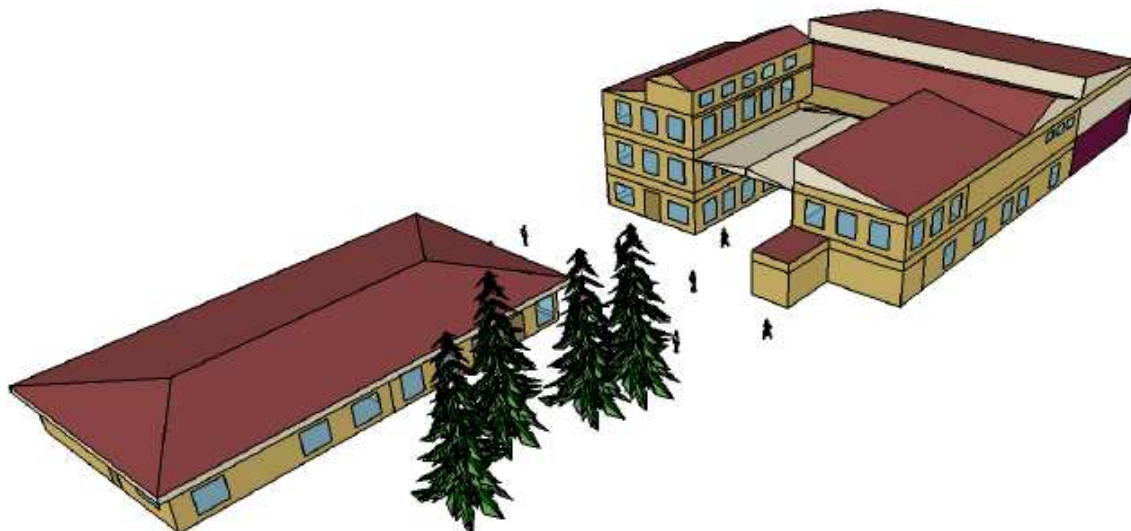


Figura 5.1. Representação esquemática do prédio comercial em estudo.

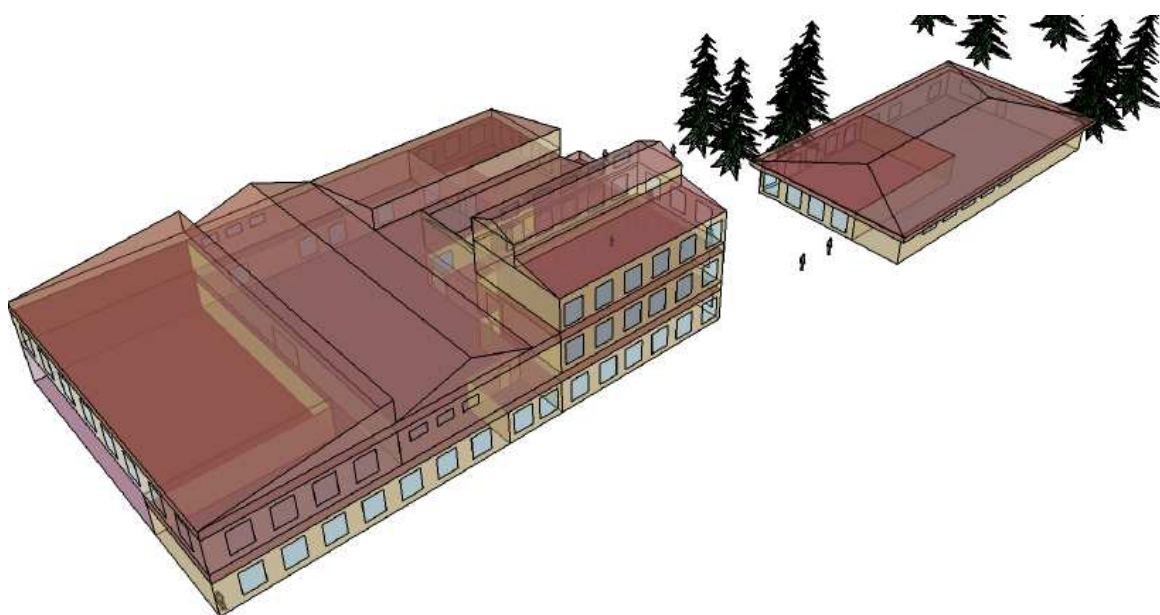


Figura 5.2. Visualização interna das edificações.

Os dados de entrada como paredes, teto, piso, telhado, etc., e também quaisquer características construtivas e orientações geográficas foram automaticamente repassadas do *Skteckup* para o  $e^+$  através da utilização do *plugin Open Studio*. Todos os itens referentes à geração de calor nas zonas, ou seja, ocupação, taxa metabólica, equipamentos elétricos, iluminação, sistema de

condicionamento de ar e as propriedades térmicas dos materiais construtivos, envoltória, etc, também foram inseridos no modelo computacional via Editor do *EnergyPlus*.

De acordo com Lamberts *et al.* (2010) o valor mais adequado para ser adotado para a fração radiante de ganho de calor é de 0,5, sendo este valor comumente utilizado por grande parte dos pesquisadores como também neste trabalho, tendo em vista que a divisão entre as parcelas radiante e convectiva (de ganho de calor) para grande parte dos equipamentos é geralmente uniforme.

As propriedades físicas dos materiais construtivos utilizados estão relacionadas na tabela 5.2 e a figura 5.3 possui uma representação esquemática das paredes da edificação.

Tabela 5.2. Características dos materiais utilizados na simulação (fonte: Lamberts *et al.* - 2010).

| Material                                                   | Condutividade térmica (W/(m.K)) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/(kg.K)) | Absortância | Resistência térmica ((m <sup>2</sup> .K)/W) |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------------|
| Argamassa reboco 2,5cm                                     | 1,150                           | 2000                           | 1000                        | 0,2         | 0,022                                       |
| Concreto maciço 10,0cm                                     | 1,750                           | 2200                           | 1000                        | 0,3         | 0,057                                       |
| Telha cerâmica 1,0cm                                       | 1,050                           | 2000                           | 920                         | 0,4         | 0,010                                       |
| Telha fibrocimento 1,0cm                                   | 0,950                           | 1900                           | 840                         | 0,3         | 0,050                                       |
| PVC forro 1,0cm                                            | 0,200                           | 1350                           | 960                         | 0,2         | 0,050                                       |
| Madeira para porta 3,0cm                                   | 0,150                           | 600                            | 1340                        | 0,2         | 0,200                                       |
| Tijolo cerâmico maciço 10cm, com argamassa de assentamento | 0,900                           | 1764                           | 920                         | 0,3         | 0,107                                       |

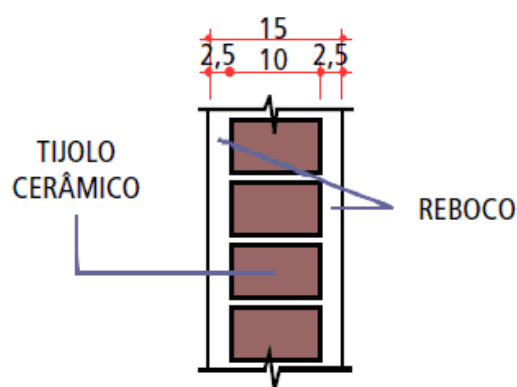


fig. 5.3. Desenho esquemático das paredes - adaptação (Lamberts *et al.* - 2010)

De acordo com o manual do *EnergyPlus* (2012), alguns algoritmos de solução de transferência de calor e massa pelos elementos construtivos da edificação podem ser utilizados nas simulações, entre eles:

- CTF (*Conduction Transfer Function*) - Considera apenas o calor sensível e não leva em consideração o armazenamento ou difusão de umidade nos elementos de construção. É o algoritmo que foi utilizado neste trabalho;
- MTF (*Moisture Transfer Function*) - Algoritmo de solução simultânea de transferência de calor e massa e considera a absorção de vapor na edificação;
- EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) - Considera a difusão de calor sensível e o armazenamento de umidade nas superfícies internas, necessitando de informações adicionais das características de umidade dos materiais.

As rotinas (*schedule*) foram utilizadas para prever os padrões de uso de cada ambiente ou zona térmica, ou seja, períodos diferenciados de acionamento das lâmpadas, cargas elétrica, ocupação, etc, definindo assim a carga térmica correta ao longo do tempo para que o funcionamento e controle do sistema de condicionamento de ar possa representar a realidade dinâmica da edificação.

O modelo ainda permite a entrada de informações como coordenadas geográficas, altitude, arquivo climático, infiltração de ar, etc. São muitas as possibilidades de entrada de dados e variações na representação do modelo.

Os relatórios de saída são escolhidos pelo projetista conforme a sua necessidade de resultados. Os principais formatos nos quais o e<sup>+</sup> permite gerar relatórios são as planilhas eletrônicas ou o HTML (*hypertext markup language*).

## 6. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO

A metodologia de simulação e calibração adotada permitiu a avaliação do desempenho energético do edifício e a avaliação da economia de energia da intervenção proposta. Em resumo, a aplicação da metodologia segue quatro passos:

1. *Modelagem*: representar a forma real da geometria da edificação com o auxílio do *Google SketchUp*; utilizar fotografias, plantas e dados de levantamento; retratar a dinâmica da edificação e; utilizar arquivo climático da cidade no *EnergyPlus*;
2. *Desempenho Energético*: utilizar o *EnergyPlus* para prever os resultados da simulação termoenergética;
3. *Verificação dos resultados e ajustes*: analisar os relatórios de saída comparando os dados obtidos aos medidos por instrumentos. Realizar ajustes caso necessário analisando a documentação coletada;
4. *Análise da sensibilidade e incerteza*: verificação da sensibilidade dos principais dados de saída do modelo em relação aos dados de entrada e analisar a incerteza de medição.

### 6.1. Metodologia de Simulação

A simulação consistiu em encontrar o consumo de energia, demanda elétrica e temperaturas internas do modelo a fim de verificar a redução mensal do consumo de energia durante os 12 meses do ano de 2011. Para a simulação computacional foram inseridas no e<sup>+</sup> os dados levantados da edificação. Dados bibliográficos ou valores *default* na ausência de valores levantados.

Com a simulação computacional o *software EnergyPlus* (e<sup>+</sup>) permitiu a obtenção de dados de saídas de temperatura de bulbo seco interno, consumo de energia e demanda elétrica a edificação, os quais foram comparados com os dados disponíveis por medição buscando a calibração do modelo computacional.

## 6.2 – Metodologia de Calibração

No trabalho de Zmeureanu *et al.* (1995) a calibração de energia foi baseada na comparação dos resultados do consumo de energia e demanda elétrica, utilizando como meio de ajustes a alteração dos valores de alguns parâmetros de entrada. A calibração foi considerada aceita quando encontrado diferenças entre os dados simulados e os reais de 5% anuais e 10 a 15 % mensal.

De acordo com Pedrini (1997), a calibração consiste em comparar dados do sistema real com os da simulação com o objetivo de corrigir os dados de entrada para melhorar a fidelidade. Quanto maior o nível de detalhamento do caso analisado mais realistas são o modelo e os resultados, porém maiores são os custos e o tempo demandado. A geração do modelo e os resultados também são influenciados por fatores inerentes ao analista com sua subjetividade e experiência de interpretação do caso real.

Segundo Westphal (2007) na etapa de calibração os dados de saída utilizados para aferição do modelo na maioria dos casos são o consumo de energia elétrica (horário, mensal e anual) e a temperatura interna. Os ajustes nos parâmetros de entrada são feitos sobre as variáveis que o usuário possui maior incerteza quanto ao seu valor real ou sobre aquelas que não foram definidas inicialmente no modelo. Nesse último caso, geralmente o simulador adota valores pré-definidos pelo programa (*defaults*) para que o modelo fique completo e a simulação possa ser efetuada pela primeira vez. Na prática, a calibração é um processo subjetivo, dependendo muito da experiência do simulador para o alcance da precisão desejada em tempo hábil.

De acordo com Pedrini (1997), um dos principais motivos das discordâncias entre os valores simulados e a realidade advém dos dados de entrada que em muitos casos são declarados pelos usuários. Como a melhoria da obtenção de valores mais precisos das variáveis de entrada demanda de mais recursos, há uma tendência de relacionar a melhora da precisão dos dados de entrada com o aumento dos custos. Entretanto, o aumento destes custos nem sempre traduz a melhoria da precisão do modelo, acentuando a importância dos métodos de calibração.

Pedrini (1997) ainda descreve sobre a sensibilidade que quantifica a influência de algumas variáveis sobre os resultados finais. Relata que estudos

pressupõem que as principais cargas térmicas são suspeitas de influenciar os resultados e que as incertezas dos valores atribuídos às cargas podem ser as primeiras a serem ajustadas.

Para uma verificação inicial do modelo foram comparados os dados simulados pelo e<sup>+</sup> referente ao *chiller* novo com os dados de consumo de energia mensais retirados das faturas de energia do CITS para os meses de setembro, outubro e novembro do ano de 2011. Ajustes foram realizados no modelo computacional até que a diferença entre os valores do consumo de energia permanecessem inferiores à tolerância de 20 %, proposto por Lamberts (2005).

A participação percentual (%) do *chiller* 60 TR no consumo total de energia mensal da edificação foi definida com extrapolação para os 21 dias úteis do mês de setembro de 2011 dos valores medidos do consumo de energia realizadas no próprio *chiller* pelo período de 48 horas (28 a 30 de setembro de 2011). Os três meses citados foram escolhidos por já refletirem o sistema em funcionamento com a utilização do novo *chiller*, bem como por serem considerados meses com semelhante participação do *chiller* no consumo total da edificação em virtude da estação da primavera não serem meses típicos de férias dos funcionários.

Após a verificação inicial a partir das faturas de energia, a calibração do modelo da edificação do cenário com o *chiller* de 60 TR novo ocorreu comparando os dados simulados pelo e<sup>+</sup> com os dados medidos de consumo total de energia e demanda elétrica e temperatura em base horária no período de 48 horas (28 a 30 de setembro de 2011).

A partir deste modelo foram realizados ajustes até que diferença entre as grandezas simuladas de temperatura, demanda e consumo de energia não excedesse em 15 % em relação aos valores medidos em campo.

Dessa forma foram utilizados os seguintes passos básicos com o objetivo de calibrar o sistema:

- Comparar os resultados de consumo de energia elétrica, demanda e temperatura interna simulada com os dados de energia (base mensal), demanda e temperatura interna (base horária) medidos em campo;
- Avaliar diferenças entre os resultados da simulação e os dados da medição, elaborando gráficos de barras e gráficos de dispersão x-y para identificar os padrões de erro;

- Avaliar a exatidão da calibração desejada para simulação;
- Se necessário realizar uma nova simulação, revendo os dados de entrada, recorrendo a informações de funcionamento reais da instalação (ajustes).
- Análise da sensibilidade da resposta dos principais dados de saída em relação aos dados de entrada e estimada a incerteza dos resultados.

Os principais parâmetros que sofreram ajustes durante a etapa de calibração foram os calendários em relação ao funcionamento dos equipamentos e de ocupação das pessoas, além de valores em relação à infiltração do ar.

## 7. SIMULAÇÕES DO MODELO BASE

Vários foram os pré-modelos simulados até que se pudesse chegar ao modelo considerado como base. Os modelos iniciais foram aqueles realizados durante a curva ascendente de aprendizado em relação à simulação computacional e a metodologia.

Já com o modelo base montado, foi possível inserir todas as informações disponíveis e realizar as simulações computacionais, avaliando os padrões de erros entre os valores de temperaturas de bulbo seco interno e externo medidos por instrumentos e os obtidos internamente através da simulação utilizando o arquivo climático da cidade. Para o consumo de energia, o valor mensal simulado foi comparado ao valor para o mês de setembro obtido pela extrapolação dos valores medido no local durante o período de 48 horas (28 a 30 de setembro de 2011). A demanda elétrica sofreu comparações em relação aos horários de funcionamento do modelo, como também entre demanda real do *chiller* e a simulada.

### 7.1 Análise da fatura

O consumo medido por instrumento diretamente no *chiller* em estudo representou o valor de 135 kWh/dia-util. Dessa forma o consumo extrapolado para os 21 dias úteis do mês de setembro do ano de 2011 foi de 2.835 kWh/mês. Com esse valor foi possível verificar a representatividade do *chiller* na fatura mensal de energia da concessionária para o edifício referente ao mês de setembro. O consumo de energia faturado pela concessionária do *chiller* para os meses de outubro e novembro do ano de 2011 foram estimados pela porcentagem obtida para o mês de setembro.

A tabela 7.1 mostra as estimativas de consumo de energia do equipamento em relação à leitura realizada pelo medidor da concessionária de energia elétrica, bem como o padrão de erro em relação à simulação do modelo base. É possível verificar que o padrão de erro desejado (máximo de 20 %) é atendido pelo modelo base.

Tab. 7.1 – Consumo de energia elétrica para o novo *chiller*

| <b>Mês</b>      | <b>Consumo<br/>faturado pela<br/>Concessionária<br/>(kWh/mês)</b> | <b>% fatura</b> | <b>Valores<br/>simulados<br/>do modelo<br/>BASE</b> | <b>Padrão de<br/>erro<br/>(Faturado x<br/>Simulado)</b> |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Setembro / 2011 | 2.835                                                             | 5 %             | 2.476                                               | 12.6%                                                   |
| Outubro / 2011  | 3.250 (estimado<br>pelo % fatura)                                 | 5 %             | 2.724                                               | 16.1%                                                   |
| Novembro / 2011 | 3.411 (estimado<br>pelo % fatura)                                 | 5 %             | 3.026                                               | 11.3%                                                   |

## 7.2. Temperatura interna

Comparativamente, entre as temperaturas internas medidas e as simuladas pelo e+, verifica-se pela figura 7.1 que houve semelhança no comportamento de ambas. O desvio máximo entre os valores ocorreu no dia 30/09/2011 as 9h00min com a diferença entre as temperaturas de 16 %, ou seja, de 3,5 °C conforme demonstrado na figura 7.2. As comparações de temperatura são um bom indicativo em verificar as tendências da simulação e permite ajustes caso necessário. A calibração do modelo somente será completada diante das comparações de semelhança das medições de demanda e consumo de energia elétrica medidos em campo e os simulados pelo e+. Observa-se na figura 7.1 que a temperatura interna medida possui a tendência de aumentar de valor após as 18:00 horas. Esse fato foi atribuído ao desligamento do sistema de climatização e a possível existência de computadores ou outros equipamentos que não foram desligados a noite pelos usuários, contrariando as informações iniciais. Porém, como o padrão de erro permaneceu dentro dos limites desejados, optou-se por permanecer com os calendários estabelecidos inicialmente no modelo base.

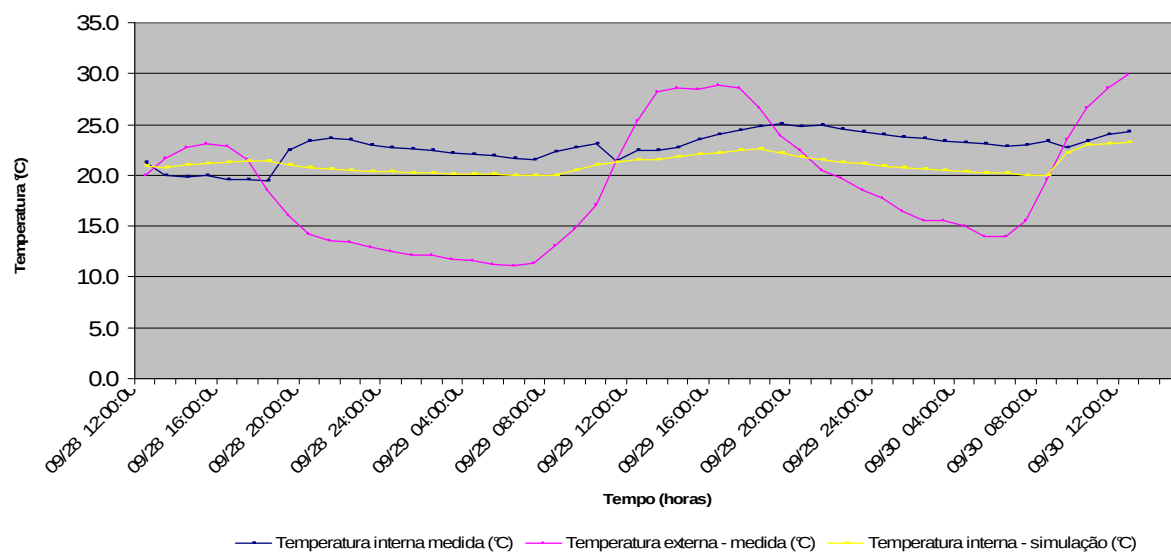


Figura 7.1. – Evolução temporal das temperaturas interna e externas medidas experimentalmente e da temperatura interna simuladas pelo e+.

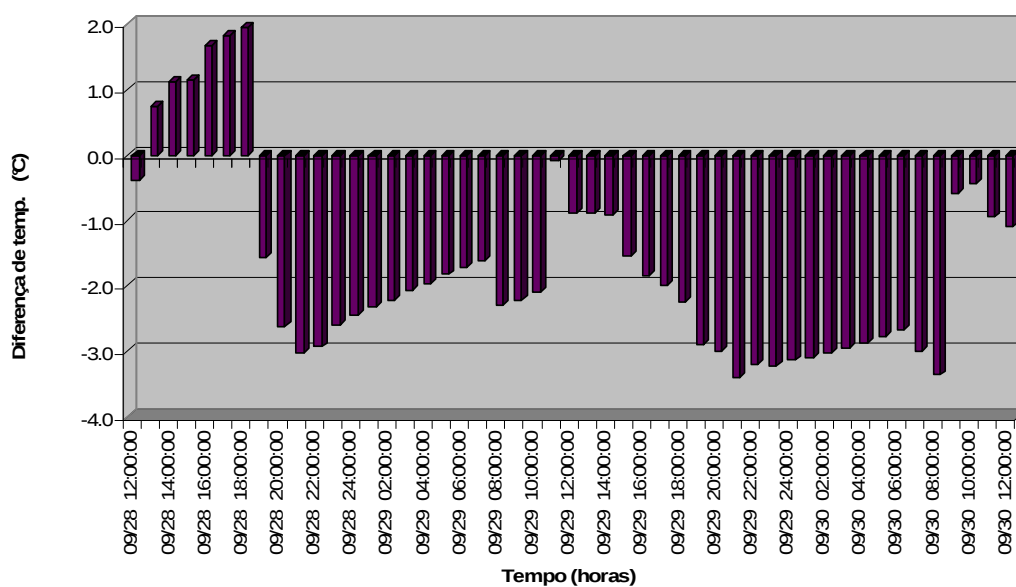


Figura 7.2. Diferença absoluta entre as temperaturas interna medidas experimentalmente e simuladas pelo e+.

### 7.3 Consumo de Energia

Os resultados de consumo de energia elétrica das simulações energéticas para o novo *chiller* 60 TR podem ser verificados na tabela 7.2 durante a medição de campo por instrumentos foi obtido o valor de 135 kWh/dia de consumo de energia elétrica entre os dias 28 a 30 de setembro de 2011. Extrapolando os dados da medição em campo para os 21 dias úteis daquele mês, chega-se ao valor de consumo de energia de 2.835 kWh/mês, que comparado ao valor do mês de setembro simulado pelo e<sup>+</sup> encontra-se uma diferença de aproximadamente 12,66 %. Esse valor permaneceu dentro dos limites desejados, não sendo necessários ajustes.

Tabela 7.2. Consumo de energia elétrica do novo chiller – 60 TR

| Mês       | Chiller [kWh] |
|-----------|---------------|
| Janeiro   | 3867          |
| Fevereiro | 4268          |
| Março     | 3305          |
| Abril     | 2564          |
| Maio      | 2714          |
| Junho     | 2502          |
| Julio     | 2047          |
| Agosto    | 2310          |
| Setembro  | 2476          |
| Outubro   | 2724          |
| Novembro  | 3026          |
| Dezembro  | 2890          |

### 7.4 Demanda de energia elétrica

Analisando a figura 7.3, a qual mostra a demanda elétrica medida por instrumento e a simulada pelo e<sup>+</sup>, verificou-se que os valores medidos pelo analisador de energia apresentou elevados picos e ausência de consumo. Já a

demanda simulada por meio computacional permaneceu estável durante o período de utilização.

A média das demandas são próximas, ou seja, na ordem de 13,5 kW para o modelo computacional e 14,0 kW para o cenário medido por instrumentos. Percebe-se ainda pela figura 7.3 que os horários de funcionamento do equipamento foram os mesmos nos dois cenários, ou seja, entre as 8:00 e as 18:00 horas somente em dias úteis. Assim pode inferir dessa figura que de uma forma simplificada que a área para a situação simulada equivale à energia consumida pelo *chiller*, ou seja, 13,5 (kW) multiplicado por 10 (horas) resultam no consumo diário de 135 kWh/dia, mesmo valor de energia medido em campo através de equipamentos.

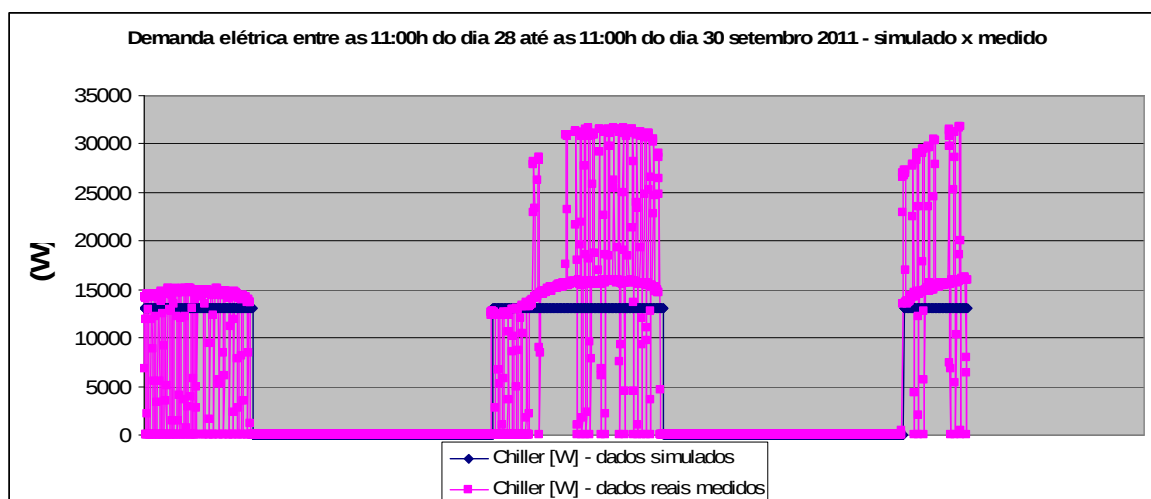


Figura 7.3. Comparação entre as demandas elétricas medida e simulada

A figura 7.4 mostra a curva de carga do *chiller* obtida pelo modelo computacional durante o mês de janeiro. Observa-se que a demanda chega a picos de 30 kW, sendo este número é superior comparado ao do mês de setembro no início da primavera. Percebe-se, de acordo com essa figura, que o *chiller* está superdimensionado, pois os valores de potência requerida não chegam a superar 30 kW, valor inferior aos dados de catálogo de potência do equipamento que é de 60 kW. Conforme relatado em entrevista no local, futuramente haverá expansão de algumas salas que o sistema deverá atender.

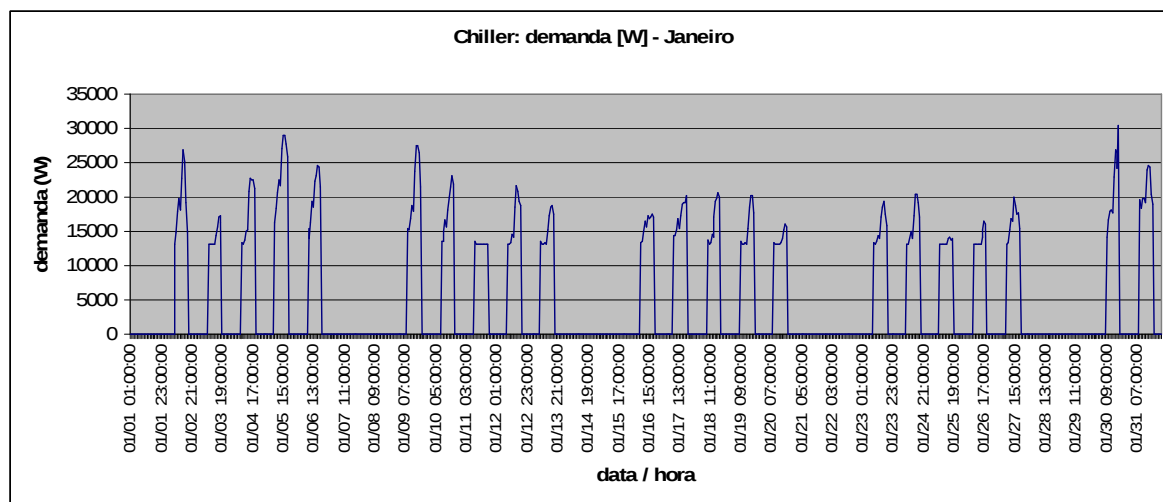


Figura 7.4 Curva de carga elétrica do mês de janeiro obtida através de simulada computacional.

## 7.5 Economia de energia

Após a simulação do modelo base para os dois cenários foi possível obter a redução do consumo de energia de energia proporcionada pela ação do *retrofit*.

A simulação do consumo de energia no cenário com o *chiller* antigo foi possível mediante a substituição das características técnicas deste equipamento no modelo calibrado, ou seja, foi retratado o *chiller* antigo no mesmo modelo computacional no qual foi realizada a simulação com o *chiller* novo.

A economia de energia gerada pela ação do retrofit para o ano de 2011 foi encontrada através dos cálculos das diferenças entre os consumos de energia mensais das simulações dos cenários com o *chiller* novo e o antigo. A Tabela 3 ilustra a comparação dos dados de consumo de energia dos dois cenários, bem como o resultado da economia de energia com base na ação do *retrofit* proposto. Nota-se que antigo *chiller* possui rendimento 30 % inferior ao do novo *chiller*.

Tabela 7.3 - Consumo simulado – comparação entre o novo chiller e o antigo.

| <b>Mês</b>          | <b>Chiller Novo [kWh]</b> | <b>Chiller Antigo [kWh]</b> | <b>Economia MWh</b> |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Janeiro             | 3867                      | 5960                        | 2093                |
| Fevereiro           | 4268                      | 6417                        | 2149                |
| Março               | 3305                      | 5037                        | 1732                |
| Abril               | 2564                      | 3871                        | 1307                |
| Maio                | 2714                      | 4098                        | 1384                |
| Junho               | 2502                      | 3777                        | 1275                |
| Julho               | 2047                      | 3090                        | 1043                |
| Agosto              | 2310                      | 3487                        | 1177                |
| Setembro            | 2476                      | 3738                        | 1262                |
| Outubro             | 2724                      | 4112                        | 1388                |
| Novembro            | 3026                      | 4579                        | 1553                |
| Dezembro            | 2890                      | 4353                        | 1463                |
| Economia de Energia |                           |                             | 17,8 MWh/ano        |

## 8. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E INCERTEZA

Os ajustes no modelo base foram realizados durante a sua calibração, restando para a análise de sensibilidade e incerteza apenas a verificação da qualidade das respostas do modelo base. Os valores das incertezas não devem afetar significativamente o valor da economia de energia gerada.

As análises de sensibilidade e de incerteza foram aplicadas para o *chiller* novo utilizando o modelo base. A incerteza de medição do cenário com o antigo *chiller* foi considerada a mesma com o novo, pois os modelos utilizados para ambos os casos são os mesmos.

A análise da sensibilidade do modelo foi realizada através de simulações computacionais variando os fatores de entrada em torno (próximos) de seus valores nominais e verificando as variações na saída. Apenas aqueles parâmetros realmente significativos são considerados e os parâmetros sem influências significativas são desconsiderados. As simulações nestas condições são necessárias para separar os dados que realmente possuem forte influência nos resultados, daqueles que possuem fraca influência.

Para diminuir o tempo de simulação, o período de teste foi realizado entre os dias 28 a 30 de setembro de 2011.

A bibliografia relata que os parâmetros de forte influência de variação são aqueles ligados à carga térmica. Analisando o modelo calibrado foi possível também determinar alguns parâmetros que geraram dúvidas durante introdução de seus valores no programa computacional. A tabela 8.1 relaciona os principais parâmetros analisados, bem como os resultados da influência deles no consumo de energia. A influência foi definida neste trabalho como aqueles que alteram o consumo de energia em 0.5%, ou 1.2 kWh (48 horas).

A análise de incerteza de medição do modelo computacional iniciou-se com a simulação computacional alterando os valores da lista de parâmetros com maior influência da tabela 8.1, cujos resultados são mostrados nas tabelas 8.2, 8.3 e 8.4. As variações nos parâmetros de entrada ocorreram até os valores considerados como limites extremos dentro da possibilidade de ocorrência (realidade), pois o objetivo foi encontrar os extremos das respostas de consumo de energia dentro da margem de incerteza.

Com a utilização deste método foi possível determinar uma amostra de possíveis modelos computacionais que permitiram estimar o consumo anual de energia elétrica da edificação, com uma determinada precisão. Dessa forma, utilizando um gráfico de barras ou histograma (figura 8.1), foi determinado o desvio padrão (incerteza padrão) do modelo em função de suas respostas, como também a incerteza expandida do modelo para 95 % de certeza com fator  $k=2$ . A média  $\mu$  permaneceu praticamente o mesmo valor da simulação facilitando os cálculos.

Tab. 8.1. Análise de Sensibilidade

| Parâmetro                       | Valor inicial do parâmetro              | Parâmetro com pequena Variação ( 5-10 %) | Consumo de energia inicial (kWh) – 2 dias | Consumo de energia após variação (kWh) – 2 dias | Diferença - consumo de energia (kWh) – 2 dias | Resultado (kWh) – |
|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|
| Calendário da ocupação          | 90 % entre 8:00 -12:00h e 13:00 -18:00h | 80 %                                     | 257.93                                    | 257,93                                          | 0,01                                          | Sem influência    |
| Potência dos computadores       | 100 W                                   | 110 W                                    | 257.93                                    | 257,93                                          | 0,02                                          | Sem influência    |
| Calendário da Iluminação        | 90 % entre as 8:00 e 17:00 horas        | 80 %                                     | 257.93                                    | 257.93                                          | 0.01                                          | Sem influência    |
| Quantidade de pessoas em férias | 10 %                                    | 20 %                                     | 257.93                                    | 238.89                                          | 18.11                                         | Influente         |
| Velocidade do ar - infiltração  | 0,03 m/s                                | 0.04 m/s                                 | 257.93                                    | 264.76                                          | 6.83                                          | Influente         |
| Trocas de ar - infiltração      | 1 por hora                              | 1,01 por hora                            | 257.93                                    | 258.97                                          | 1.03                                          | influente         |

Tab. 8.2. Análise da incerteza - pessoas em férias

| <b>Parâmetro inicial:<br/>Quantidade de<br/>pessoas em férias -<br/>10 %</b> | <b>Valor simulado</b> | <b>Resultado (kWh)</b> |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 1</b>                                            | 15%                   | 248                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 2</b>                                            | 12,5 %                | 253                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 3</b>                                            | 7,5 %                 | 260                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 4</b>                                            | 5 %                   | 266                    |
| <b>Parâmetro</b>                                                             | 10 %                  | 257                    |

Tab. 8.3. Análise da incerteza - velocidade do ar – infiltração

| <b>Parâmetro:<br/>Velocidade do ar –<br/>infiltração – 0,03 m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Valor simulado</b>  | <b>Resultado (kWh)</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 1</b>                                               | 0,05 m <sup>3</sup> /s | 268                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 2</b>                                               | 0,04 m <sup>3</sup> /s | 264                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 3</b>                                               | 0,02 m <sup>3</sup> /s | 250                    |
| <b>Parâmetro +<br/>Variação 4</b>                                               | 0,01 m <sup>3</sup> /s | 240                    |
| <b>Parâmetro</b>                                                                | 0,03 m <sup>3</sup> /s | 257                    |

Tab. 8.4. Análise da incerteza - troca do ar - infiltração

| <b>Parâmetro: Troca do ar – infiltração por hora</b> | <b>Valor simulado</b> | <b>Resultado (kWh)</b> |
|------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Parâmetro + Variação 1</b>                        | 1,1                   | 258                    |
| <b>Parâmetro + Variação 2</b>                        | 0,9                   | 257                    |
| <b>Parâmetro + Variação 3</b>                        | 0,8                   | 256                    |
| <b>Parâmetro + Variação 4</b>                        | 1,2                   | 260                    |
| <b>Parâmetro</b>                                     | 1                     | 257                    |

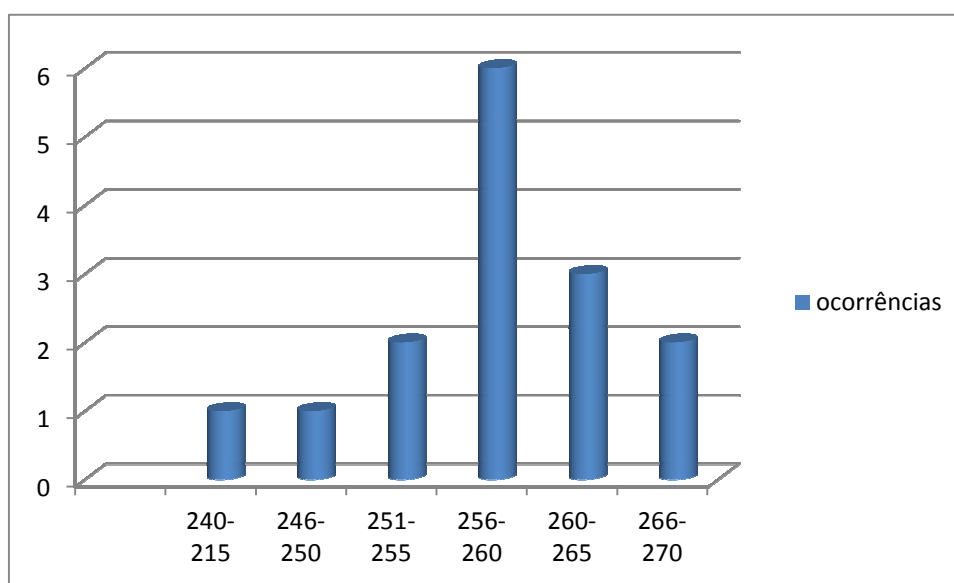


Figura 8.1. Histograma das ocorrências separado por faixa de consumo (kWh)

Os resultados obtidos para as incertezas referentes à modelagem e a medição por instrumento estão demonstrados na tabela 8.5 itens 1 e 2. O valor das incertezas foi calculado para o período de 48 horas, no qual houve a medição por instrumentos (28 a 30 de setembro de 2011). Com as porcentagens definidas

para as duas parcelas da equação, apresentada no item 3, abaixo, foi calculada a incerteza de projeto para o período de 48 horas, que resulta em uma incerteza de 5,53 % sobre o valor considerado como verdadeiro. O item 4 da tabela 8.5 demonstra os valores das simulações e suas incertezas de medição declaradas. De acordo com a equação 2, a economia de energia gerada pelo *retrofit* é encontrada pela diferença do consumo entre os dois cenários (equipamento antigo e o novo).

Tab. 7.5. Resultados da incerteza

| Item                                                | Descrição                                                             | Valor                    |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1- incerteza da modelagem (48 horas)                | Média - $\mu$ (48 horas)                                              | 256 kWh = valor simulado |
|                                                     | Desvio Padrão - $\sigma$ (incerteza padrão)                           | 7,10 kWh                 |
|                                                     | incerteza expandida - para 95 % de certeza com fator $k=2$ _modelagem | 14,20 kWh (5,52 %)       |
| 2- incerteza da medição por Instrumentos (48 horas) | incerteza expandida - para 95 % de certeza com fator $k=2$ _medidor   | 0,51 kWh (0,2 %)         |
| 3- incerteza total (48 horas)                       | $incerteza\_proj = \sqrt{(Incert\_medição)^2 + (Incert\_modelo)^2}$   | 14,21 kWh (5,53 %)       |
| 4- cálculo da economia de energia                   | Consumo Chiller Novo [MWh/ano]                                        | 34,93 $\pm$ 1,8 (5,53 %) |
|                                                     | Consumo Chiller Antigo [MWh/ano]                                      | 52,53 $\pm$ 2,7 (5,53 %) |
|                                                     | Economia [MWh/ano] - Resultado da medição = $\mu \pm 2 \sigma$ .      | 17,6 $\pm$ 4             |

Enfim, o valor correto para expressar a economia de energia gerada com 95% de certeza seria: o valor da economia de energia está na faixa 17,6  $\pm$  4 MWh/ano. É necessário considerar que foi realizado uma análise de sensibilidade simplificada ignorando vários parâmetros simplificando os resultados.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O trabalho foi desenvolvido utilizando a uma proposta de simulação computacional a fim de obter resultados de economia de energia em relação ao *retrofit* de um *chiller* de capacidade de refrigeração 60 TR. Neste contexto os principais resultados estão discutidos nos próximos parágrafos.

Não houve redução de demanda na ponta do sistema elétrico brasileiro – RDP, visto que o horário de funcionamento do modelo ocorreu entre 8:00 às 18:00 horas, sendo este o cenário verificado em setembro de 2011. A ação de desligar o *chiller* de 60 TR após as 18:00 horas ocorreu por ações propostas durante a fase de projeto na ocasião da substituição do equipamento (medidas de eficiência energética).

Verificou-se que a aplicação da opção D do IPMVP em projetos de eficiência energética com o objetivo de verificação das economias é viável, pois permitiu estimar a economia de energia pela ação de *retrofit*.

Ressalta-se que poucos dados técnicos do equipamento antigo estavam disponíveis, assim foi necessário utilizar valores já pré-definidos pelo programa e<sup>+</sup>, como também não foi conseguido inserir uma nova curva de carga do equipamento de climatização novo e antigo no e<sup>+</sup>, dessa forma foi utilizado à curva *default* do programa.

Apesar dos dados encontrados nas simulações atenderem a base comparativa de 15 % (desvios), existe a compreensão da necessidade de evoluir na qualidade dos dados de entrada do modelo nas duas situações de medição (antes e após o *retrofit*), como também no melhor entendimento de todas as outras grandezas não analisadas por desconhecimento e que poderiam influenciar a sensibilidade do modelo computacional.

Em uma M&V utilizando a simulação computacional sempre haverão dados estimados, porém a experiência e conhecimento do técnico de simulação diminuem a possibilidade de falhas ou equívocos na M&V. Uma análise da sensibilidade que avalia as contribuições dos dados de entrada para os valores finais obtidos com a simulação sempre é necessária, auxiliando a avaliação das incertezas dos resultados. A análise de sensibilidade foi realizada de forma simplificada, buscando principalmente o desenvolvimento do método de cálculo das incertezas dos resultados. Análises mais profundas podem ser realizadas,

porém o aumento da complexidade nem sempre se traduz em resultados mais confiáveis.

Em relação às perspectivas futuras, pretende-se propor a aplicação para a etapa da M&V dos projetos de eficiência energética regulados pela ANEEL no Estado do Paraná a utilização da opção D do IPMVP, quando aplicável.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Arone. PIMENTA, João. BALTORÉ, Alexandre. **ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DEMANDA ENERGÉTICA DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIO**. VIII Congresso Ibero americano de Ar condicionado e Refrigeração. 2005. Disponível em: [http://www.laar.unb.br/Publicacoes\\_LaAR\\_arquivos/ARTIGO\\_CIAR\\_Edificio.pdf](http://www.laar.unb.br/Publicacoes_LaAR_arquivos/ARTIGO_CIAR_Edificio.pdf). Acessado em: 01/06/2011.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **MANUAL PARA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. 2008. 64 p.

AUGENBOE, Godfried. **BUILDING SIMULATION TRENDS GOING INTO THE NEW MILLENIUM**. Georgia Institute of Technology. Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro: 2001. Disponível em: [http://www.ibpsa.org/%5Cproceedings%5CBS2001%5CBS01\\_0015\\_28.pdf](http://www.ibpsa.org/%5Cproceedings%5CBS2001%5CBS01_0015_28.pdf). Acessado em: 09/01/2012.

BALTAR, Marta Garcia. **REDUÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO PARÂMETROS CONSTRUTIVOS VISANDO AO CONFORTO TÉRMICO**. PUCRS. Dissertação. 101 p. 2006.

Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2012 – ANO BASE 2011: RESULTADOS PRELIMINARES**. Rio de Janeiro: 51 p. 2012. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados\\_Pre\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf). Acessado em: 08/11/2012.

BATISTA, Juliana Oliveira. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DE COMPONENTES CONSTRUTIVOS UTILIZANDO O ENERGYPLUS**. ENCAC. 2005. Disponível em: <http://www.ufpel.edu.br/faurb/prograu/documentos/artigo1-tecnologia.pdf>. Acessado em: 10/05/2011.

CLARKE J. A; STRACHAN P.; PERNOT C. **AN APPROACH FOR CALIBRATION MODELS OF ENERGY SIMULATION OF BUILDINGS**. Transações ASHRAE. pg. 917-927. 1993. Disponível em: <http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/93/calibration.pdf>. Acessado em: 29/11/2011.

CRAWLEY, Drury B. LAWRIE, Linda K. PEDERSEN, Curtis O. WINKELMANN, Frederick C. **ENERGYPLUS: ENERGY SIMULATION PROGRAM**. Journal ASHRAE Online, vol. 42, n° 4, pg. 49-56. 2000. Disponível em: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/pdfs/bibliography/ashrae\\_journal\\_0400.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/pdfs/bibliography/ashrae_journal_0400.pdf). Acessado em: 20/01/2012.

CRAWLEY, Drury B. **ESTIMATING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE AND URBANIZATION ON BUILDING PERFORMANCE**. Journal of Building Performance Simulation, pg. 91-115. Nov, 2008.

DONATELLI, Gustavo Daniel, KONRATH, Andréa. **SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO**. Revista de Ciência & Tecnologia. V. 13, Nº 25/26 – pg. 5-15. 2005.

EVO - Efficiency Valuation Organization. **PROTOCOLO INTERNACIONAL DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO (PIMVP)**. 116 p. 2010.

EISENHOWER, Bryan, O'NEILL, Zheng, FONOBEROV, Vladimir A, MEZIC, Igor. **UNCERTAINTY AND SENSITIVITY DECOMPOSITION OF BUILDING ENERGY MODELS**. Journal of Building Performance Simulation. Jan, 2011.

FEMP - U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program. **M&V GUIDELINES: MEASUREMENT AND VERIFICATION FOR FEDERAL ENERGY PROJECTS**. 3º versão. 2008. Disponível em: [www1.eere.energy.gov/femp/](http://www1.eere.energy.gov/femp/). Acessado em: 29/02/2012.

FREIRE, Ian Felisberto. **MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO BASELINE**. Universidade Federal de Santa Catarina - USFC. Dissertação. 103 p. 2001.

GOMES, Maria Filomena. **QUANTIFICAÇÃO DA INCERTEZA NAS MEDIÇÕES ANALÍTICAS. GUIA EURACHEM/CITAC**. Out. 2001. Disponível em: [http://www.eurachem.fc.ul.pt/Guia\\_Eurachem\\_P.pdf](http://www.eurachem.fc.ul.pt/Guia_Eurachem_P.pdf). Acessado em: 10/07/2012.

HAASE, Matthias, SARTORI, Igor, DJURIC, Natasa, HOSEGGEN, Rasmus. Institute for Energy and Process Technology, Trondheim, Norway. **SIMULATION OF ENERGY-EFFICIENT OFFICE BUILDINGS IN NORWAY**. Eleventh International IBPSA Conference. 2009. Disponível em: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09\\_1857\\_1864.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1857_1864.pdf). Acessado em 15/01/2012.

HERNANDEZ NETO, Alberto. FIORELLI, Flávio Augusto Sanzovo. **UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO PARA A GESTÃO DE EDIFÍCIOS DEMANDA DE ENERGIA**. Universidade de São Paulo. Proceedings: Building Simulation. 2007. Disponível em: [www.ibpsa.org](http://www.ibpsa.org). Acessado em: 15/05/2011.

HOES, P, HENSEN J.L.M, LOOMANS, M.G.L.C, VRIES, B. de, BOURGEOIS, D. **USER BEHAVIOR IN WHOLE BUILDING SIMULATION**. Energy and Buildings, nº 41. p 295–302. 2009.

HOPFE, Cristina, HENSEN, Jan, PLOKKER, Wim. **INTRODUCING UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSIS IN NONMODIFIABLE BUILDING PERFORMANCE SOFTWARE**. Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands. IBPSA Conference Germany, Munich. 2006, Disponível em [http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/06\\_bausim\\_hopfe.pdf](http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/06_bausim_hopfe.pdf). Acessado em 10/01/2012.

HOPFE, Cristina. **UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSIS IN BUILDING PERFORMANCE SIMULATION FOR DECISION SUPPORT AND DESIGN OPTIMIZATION**. Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands. Tese de Doutorado. 2009. 215 p. Disponível em: [www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/Hopfe.pdf](http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/Hopfe.pdf). Acessado em: 01/10/2012.

IEA - Agencia Internacional de Energia. **IEA-ECBCS ANEXO 53: CONSUMO TOTAL DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS - MÉTODOS DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE AUDITORIA ASSISTIDA BASEADA EM EVIDÊNCIAS PELA METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO**. 2010. Disponível em: [www.ecbcs.org/annexes/annex53.htm](http://www.ecbcs.org/annexes/annex53.htm). Acesso em: 02/11/2010.

INEE.- Instituto Nacional de Eficiência Energética. **INTRODUÇÃO AO USO DA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE ECONOMIAS DE ENERGIA NO BRASIL**. 1997. 46 p. Disponível em: <http://www.inee.org.br>. Acesso em: 20/05/2011.

YOON, Jong, LEE, Euy. **CALIBRATION PROCEDURE FOR ENERGY PERFORMANCE SIMULATION OF A COMMERCIAL BUILDING**, Journal of Solar n°125. pg. 251–257. 2003.

KIKEGAWA, Yukihiro, GENCHI, Yutaka, YOSHIKADO, Hiroshi, KONDO, Hiroaki. **DEVELOPMENT OF A NUMERICAL SIMULATION SYSTEM TOWARD COMPREHENSIVE ASSESSMENTS OF URBAN WARMING COUNTERMEASURES INCLUDING THEIR IMPACTS UPON THE URBAN BUILDINGS' ENERGY-DEMANDS**. Applied Energy n°76. pg. 449–466. 2003.

LIMA JUNIOR, Paulo. SILVEIRA, Fernando Lang. **DISCUTINDO OS CONCEITOS DE ERRO E INCERTEZA A PARTIR DA TÁBUA DE GALTON COM ESTUDANTES DE GRADUAÇÃO: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A INCORPORAÇÃO DE NOVAS ABORDAGENS DA METROLOGIA AO ENSINO DE FÍSICA SUPERIOR**. UFRGS. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 28, n. 2: pg. 400-422, ago. 2011.

LOMAS, K. J, Eppel, H . **SENSITIVITY ANALYSIS TECHNIQUES FOR BUILDING thermal simulation programs**, Energy and Buildings, pg.21-43, 1992.

LAMBERTS, Roberto, MELO, Ana Paula. USFC. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE. **O MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROGRAMA ENERGYPLUS**. 20 p. 2008.

LAMBERTS, Roberto, WESTPHAL, Fernando; **BUILDING SIMULATION CALIBRATION USING SENSITIVITY ANALYSIS** 9º Conferência International - IBPSA Montreal, Canadá , 2005.

LAMBERTS, Roberto. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. **CASA EFICIENTE: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TERMO-ENERGÉTICO**. V. 4. 53 p. 2010

LAMBERTS, Roberto. GOULART, Solange, FIRMINO, Samanta. **DADOS CLIMÁTICOS PARA PROJETO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES PARA 14 CIDADES BRASILEIRAS**. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. 1998. 345 p.

LEITE, Fabio Correa.. **MODELAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL NO SETOR INDUSTRIAL PELA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO**. Universidade de São Paulo – USP. 2010.

MARQUES, Gilberto. **SISTEMAS DE APOIO À MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO**. Dissertação. 2009. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 101 p.

MARTINS, Márcio A. F, KALID Ricardo A., NERY, Gesner A., TEIXEIRA, Lucas Aguiar, GONÇALVES, Guilherme., **COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS LINEAR E NÃO LINEAR PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO** Revista Controle & Automação/Vol.21. 2010.

MATOS, Michele. **USO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL: ESTUDO DE CASO NO PRÉDIO DA ENGENHARIA CIVIL – UFSC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Trabalho de conclusão de curso. 2004. 73 p.

MELO, ANA Paula. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA NO CONSUMO DE ENERGIA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. USFC. 2007. 86 p.

**M&V GUIDELINES: MEASUREMENT AND VERIFICATION FOR FEDERAL ENERGY PROJECTS**. 2008, U.S. Department of Energy. Disponível em: [http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/mv\\_guidelines.pdf](http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/mv_guidelines.pdf). Acessado em: 23/12/2011.

MARINO, Simeone, HOGUE, Ian B, RAY Christian J , KIRSCHNER, Denise E.. **A METHODOLOGY FOR PERFORMING GLOBAL UNCERTAINTY AND SENSITIVITY ANALYSIS IN SYSTEMS BIOLOGY**. JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY. Volume 254, Issue 1, 7 September 2008, PG 178–196. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519308001896>. Acessado em: 20/07/2012.

MENDES, Nathan; WESTPHAL, Fernando; LAMBERTS, Roberto; CUNHA NETO, José A. Bellini da. **USO DE INSTRUMENTOS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3657/2013>. Acesso em: 01/04/2011.

NEYMARK, J., JUDKOFF, R., KNABE, G. **APPLYING THE BUILDING ENERGY SIMULATION TEST (BESTEST) DIAGNOSTIC METHOD TO VERIFICATION OF SPACE CONDITIONING EQUIPMENT MODELS USED IN WHOLE-BUILDING ENERGY SIMULATION PROGRAMS.** Energy and Buildings n° 34 p. 917–931. 2002.

PEDRINI, Aldomar. USFC. Universidade Federal de Santa Catarina. **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES.** Dissertação. 1997. 169 p. Disponível em: [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO\\_Aldomar\\_Pedrini.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Aldomar_Pedrini.pdf). Acessado em: 12/12/2011.

RAFTERY, Paul, KEANE, Marcus, COSTA, Andrea. **CALIBRATION OF A DETAILED SIMULATION MODEL TO ENERGY MONITORING SYSTEM DATA: A METHODOLOGY AND CASE STUDY.** XI conferência International IBPSA. 2009. Disponível em: [zuse.ucc.ie/iruse/papersNew/PaulGlasgow.pdf](http://zuse.ucc.ie/iruse/papersNew/PaulGlasgow.pdf). Acessado em: 10/10/2010.

ROSENFELD, Arthur, HAFEMEISTE, David. **ENERGY EFFICIENT BUILDINGS.** Energy in Buildings. 1988. Disponível em: [http://www.calpoly.edu/~dhafemei/SciAm\\_April\\_1988\\_Energy\\_in\\_Buildings.pdf](http://www.calpoly.edu/~dhafemei/SciAm_April_1988_Energy_in_Buildings.pdf). Acessado em: 12/01/2012

SÉBASTIEN, Thomas; PHILIPPE, André. XI Conferência Internacional IBPSA julho de 2009. **DYNAMIC SIMULATION OF A COMPLETE SOLAR ASSISTED CONDITIONING SYSTEM IN AN OFFICE BUILDING USING TRNSYS.** 2009. Disponível em: [www.ibpsa.org](http://www.ibpsa.org). Acessado em: 01/06/2011.

SHIMODA, Yoshiyuki. . XI Conferência Internacional IBPSA 2009. **POTENCIAL PARA O AVANÇO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA REFORMA DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO.** 2009. Disponível em: [www.ibpsa.org](http://www.ibpsa.org). Acessado em: 01/06/2011.

WESTPHAL, Fernando; LAMBERTS, Roberto **BUILDING SIMULATION CALIBRATION USING SENSITIVITY ANALYSIS** 9° Conferencia International - IBPSA Montreal, Canadá , 2005. Acessado em: 20/06/2012

WESTPHAL, Fernando, GUESI, Eneir, LAMBERTS, Roberto. USFC. Universidade Federal de Santa Catarina. **SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DO EDIFÍCIO SEDE DA FIESC: ESTUDO DE RETORFIT DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO,** 1997. 8 p.

WESTPHAL, Fernando, LAMBERTS, Roberto. USFC. Universidade Federal de Santa Catarina. ENCAC 1999. **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA PROPOSTA DE RETROFIT EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL – Projeto 6 Cidades - Eletrobrás,** 1999. 7 p.

WESTPHAL, Fernando. USFC. Universidade Federal de Santa Catarina. **ANÁLISE DE INCERTEZAS E DE SENSIBILIDADE APLICADAS À SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS.** Tese. 2007. 129 p.

YIN , Rongxin, XU ,Peng, PIETTE, Mary Ann, KILICCOTE , Sila. **STUDY ON AUTO-DR AND PRE-COOLING OF COMMERCIAL BUILDINGS WITH THERMAL MASS IN CALIFORNIA.** Energy and Buildings. Jan. 2009.

Zhai, Z., Chen, Q. **SENSITIVITY ANALYSIS AND APPLICATION GUIDES FOR INTEGRATED BUILDING ENERGY AND CFD SIMULATION,** Energy and Buildings, 2006. n°38, pg. 1060-1068.

ZHIZHONG, Yiqun Pan; WU, Huang Gang; CHEN, Chen. **THE APPLICATION OF BUILDING ENERGY SIMULATION AND CALIBRATION IN TWO HIGH-RISE COMMERCIAL BUILDINGS IN SHANGHAI.** Segunda Conferencia - IBPSA Cambridge, 2006. Disponível em:

[http://www.ibpsa.us/pub/simbuild2006/papers/SB06\\_252\\_261.pdf](http://www.ibpsa.us/pub/simbuild2006/papers/SB06_252_261.pdf). Acessado em 20/11/2011

ZMEUREANU, Radu, PASQUALETTO, Lora, BILAS Frederic. **COMPARISON OF COST AND ENERGY SAVINGS IN AN EXISTING LARGE BUILDING AS PREDICTED BY THREE SIMULATION PROGRAMS.** Fourth International Conference Proceedings. Madison, USA. 1995. p. 14–6.

## BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **MANUAL DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**-. 2008. 122 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **ACOMPANHAMENTO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ECONOMIA – 4º TRIMESTRE DE 2006**. 2007. 97 p. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/default.aspx> > Acesso 10/06/2010

Catálogo fabricante TRANE - Condensação a ar 20 a 150 TR. 2009.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **MANUAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA**, 1 ed. Nov. 2005. 139 p.

**DICAS DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM RESIDÊNCIAS**. acessado em <http://www.light.com.br/web/institucional/atendimento/dicas/pdfs/residencial/residencial.pdf>. 10/08/2010.

ELETROBRAS. **TENDÊNCIAS DA EFICIÊNCIA ELÉTRICA NO BRASIL - INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. 1998. 170 p.

HADDAD. Jamil. **EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL**. Grupo de Estudos Energéticos Universidade Federal de Itajubá. 2007. Itajubá.

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O NOVO MODELO DO SETOR ELÉTRICO**. 2001. 74 p. Disponível site <<http://www.inee.org.br>> . Acesso 20/08/2010.

SENAI. **CENÁRIOS ENERGÉTICOS 2020**. 1. Ed. — Curitiba, 2007. 80 p.

## ANEXO I

## CATÁLOGO DO EQUIPAMENTO CHILLER 60 TR – ATUAL