

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

SAMUEL R. GOSCH

**APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE
UM MODELO SIMPLIFICADO DE EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS
NO PROGRAMA ENERGYPLUS**

**FLORIANÓPOLIS
2005**

SAMUEL R. GOSCH

**APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE
UM MODELO SIMPLIFICADO DE EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS
NO PROGRAMA ENERGYPLUS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro Civil no Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD

Co-Orientador: Fernando Simon Westphal, M.Eng.

Florianópolis, julho de 2005

SAMUEL R. GOSCH

**APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE UM
MODELO SIMPLIFICADO DE EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS NO
PROGRAMA ENERGYPLUS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como requisito parcial para
obtenção do título de

ENGENHEIRO CIVIL

Prof. Roberto Lamberts, PhD - Orientador

Prof. Lia Caetano de Bastos – Coordenadora de TCC

Banca Examinadora:

Fernando Simon Westphal, M.Eng. – Co-Orientador

Prof. EneDir Ghisi, PhD

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.

“Dedico a pessoa mais importante
da minha vida, eu mesmo.”

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha primeira professora (mamãe), pela educação e incentivo ao aprendizado desde a pré-escola até hoje; Pela fé em mim depositada nestes vinte e um anos de vida; e é claro pelo apoio financeiro.

À um dos meus melhores amigos (papai), pelos conselhos e apoio nas horas difíceis, fazendo com que adquirisse mais confiança e determinação para vida; não esquecendo é claro, do patrocínio.

À minha irmã predileta (a única), que eu amo tanto.

Ao professor e orientador Roberto Lamberts por acreditar no meu potencial; pela oportunidade concedida; pelos anos de pesquisas no LabEEE.

Ao amigo e entusiasta, Fernando S. Westphal, por acreditar no trabalho de um garoto de piercing que apareceu no LabEEE há quase 3 anos; pelo apoio e instruções fundamentais nas pesquisas de iniciação científica e TCC; e é claro por contribuir e ter fé no desenvolvimento de uma referência de laboratório de pesquisa em simulações energéticas (Pólo).

Ao Professor Enedir Ghisi, pela amizade e pesquisas desenvolvidas; pelo exemplo de disciplina e conhecimentos transmitidos.

Aos amigos Michele Matos e Deivis Marinovski, pela amizade; pela parceria na fila do R.U. e durante os deliciosos almoços; e é claro, por terem, de algum modo, contribuído em meus estudos.

Aos colegas e pesquisadores do LabEEE, por me certificarem que não estou sozinho nesse barco (Martin, Joyce, Isabel, Eloir, Eldenir, Sérgio, Alexandra, Marcelo).

Aos amigos e professores da UNIVALI, Luís Fernando P. Salles e Luiz Alberto Duarte Filho pelos conselhos na difícil decisão de transferência de universidade.

À secretária Angela Maria Zimmermann, pela grande atenção e paciência na resolução do processo de validações de disciplinas.

ELETROSUL Centrais Elétricas S.A. por facilitar o acesso e aquisição de dados para realização do estudo.

À Banca examinadora, por aceitarem o convite.

Ao CNPq e ELETROBRÁS, pelas bolsas de estudos concedidas.

Aos amigos feitos durante curso de Engenharia Civil, tanto na UNIVALI como na UFSC.

Aos grandes amigos de Balneário Camboriú, pela amizade; pelas milhares de festas curtidas, das quais revitalizavam minha pessoa.

RESUMO

Este trabalho consiste na aplicação de uma metodologia de calibração de modelos simplificados na simulação computacional do desempenho térmico e energético de edificações, empregando-se análise de sensibilidade utilizando o programa *EnergyPlus*. O objeto de estudo foi o Edifício Sede da ELETROSUL, localizado em Florianópolis. A metodologia utilizada apresenta uma seqüência de etapas para a calibração de um modelo de edifício, onde se sugere que o usuário inicie o processo de simulação através de um modelo básico, o qual será progressivamente refinado no decorrer das etapas, até o momento em que se possa estimar o consumo real da edificação com o grau de precisão desejado. O procedimento é proposto para minimizar o longo tempo gasto na calibração de um modelo durante a simulação computacional, sendo apresentado em 6 etapas. A primeira etapa consiste em representar as cargas constantes, sem dependência do clima externo, e seus padrões de uso em uma geometria qualquer. Com a carga constante calibrada no modelo, inicia-se a segunda etapa, a qual consiste na análise de fluxo de calor nos dias de projeto (inverno e verão), onde se caracterizam o envelope e um sistema de condicionamento de ar fictício. O próximo passo é direcionado para análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada com trocas de calor significativas, ou seja, a análise é aplicada para verificar o grau de influência que os dados de entrada provocam no consumo de energia elétrica do condicionamento de ar do modelo, para um dia típico. Na quarta etapa, as variáveis de maior influência e incertezas são analisadas detalhadamente, ajustando os parâmetros de grande importância no comportamento térmico do modelo. Na etapa seguinte, substitui-se o sistema de condicionamento de ar fictício pelo real, simulando o modelo para todos os dias do ano. A última etapa é reservada para ajustes finais, da qual obtém-se o modelo calibrado. Após a quinta etapa de calibração obteve-se um modelo completo com uma variação no consumo total anual e mensal de 8% e 26%, respectivamente. Com o ajuste de alguns parâmetros (sexta etapa), o consumo simulado anual foi 6% menor que o real, com variações mensais de até 23%. Percebeu-se que não há uma variação significativa entre o consumo simulado no verão e inverno, que dificilmente poderá ser estimada através de simulação computacional, já que o acionamento do sistema de condicionamento de ar e da abertura das proteções solares é todo manual e imprevisível, dificultando a representação em um modelo computacional. A análise de sensibilidade para o condicionamento de ar é uma medida fundamental a ser estudada na calibração de modelos de edifícios empregando programas de simulação térmica e energética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fachada sul do edifício Sede da ELETROSUL.....	10
Figura 2 – Croqui em planta do primeiro pavimento do edifício	11
Figura 3 – Hipótese “A” – Uma zona térmica	15
Figura 4 – Hipótese “B” – Três zonas térmicas	16
Figura 5 – Hipótese “C” – Cinco zonas térmicas	16
Figura 6 – Fluxograma da metodologia de calibração.....	18
Figura 7 – Consumo de energia elétrica mensal – Sede ELETROSUL, out/03-set/04	24
Figura 8 – Composição de cargas diárias – verão (12 a 18 outubro).....	25
Figura 9 - Composição de cargas diárias – inverno (23 a 29 jul)	25
Figura 10 – Medição de Corrente Elétrica – 31/mai a 3/jun	26
Figura 11 – Temperaturas (4 a 9 junho).....	27
Figura 12 – Temperatura – 4/jun	28
Figura 13 – Corrente elétrica (1 a 2 junho).....	29
Figura 14 – Consumo de Hipóteses simplificadas – real x simulados.....	30
Figura 15 – Variação de consumo total	30
Figura 16 – Etapa 1a – Potência - 29/ago	32
Figura 17 – Ajuste do padrão de uso conforme memória de massa	33
Figura 18 - Padrão de uso calibrado	33
Figura 19 – Etapa 1b – Potência - 29/ago	34
Figura 20 – Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 1b.....	35
Figura 21 – Usos finais - Etapa 1b	35
Figura 22 – Modelo em 3 dimensões	36
Figura 23 – Proteção lateral vazada.....	37
Figura 24 – Correlação entre Transmissividade+Absortância e Carga térmica	41
Figura 25 – Croqui - Janela 4 do pavimento 2 – Análise dos vidros	42
Figura 26 – Comparação entre o calor absorvido e transmitido pelos dois tipos de vidro analisados.....	42
Figura 27 – Fluxo interno – Parcela absorvida	43
Figura 28 – Temperatura da zona e superficial interna	44
Figura 29 – Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 5.....	46
Figura 30 – Usos finais – Etapa 5.....	46
Figura 31 – Consumo dia 4 janeiro (simulado x real).....	47
Figura 32 - Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 6	48
Figura 33 – Usos finais – Etapa 6.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes de fluxo de calor e variáveis de entrada.....	22
Tabela 2 – Variação do Consumo total anual entre os três modelos testados	29
Tabela 3 – Potência de Iluminação e Equipamentos	31
Tabela 4 – Fontes de Calor	38
Tabela 5 – Alternativas simuladas – <i>input e output</i>	39
Tabela 6 – Coeficiente de Influência - Análise de sensibilidade.....	39
Tabela 7 – Análise de propriedades de vidros – dia de projeto (verão)	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES	1
1.2 OBJETO DE ESTUDO	2
1.3 OBJETIVO	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES	4
2.2 CALIBRAÇÃO DE MODELOS	6
2.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL	7
2.4 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA	8
3 METODOLOGIA	10
3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO	10
3.2 HISTÓRICO DO CONSUMO E DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA	12
3.3 MEDIÇÕES EM CAMPO	13
3.4 MODELAGEM PRELIMINAR	13
3.4.1 Modelos Simplificados	13
3.4.2 Programação da Entrada de Dados Geométricos	16
3.5 CALIBRAÇÃO	17
3.5.1 Etapa 1 – Calibração de Cargas Constantes	20
3.5.2 Etapa 2 – Análise dos Fluxos de Calor	20
3.5.3 Etapa 3 – Análise de Sensibilidade	21
3.5.4 Etapa 4 – Ajustes Sobre o Modelo	23
3.5.5 Etapa 5 – Simulação de um Ano Completo	23
3.5.6 Etapa 6 – Ajustes Finais	23
4 RESULTADOS	24
4.1 HISTÓRICO DO CONSUMO E DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA	24
4.2 MEDIÇÕES EM CAMPO	26
4.3 MODELAGEM PRELIMINAR	29
4.3.1 Modelos Simplificados	29
4.4 CALIBRAÇÃO	31
4.4.1 Etapa 1 – Calibração de Cargas Constantes	31
4.4.2 Etapa 2 – Análise dos Fluxos de Calor	35
4.4.3 Etapa 3 – Análise de Sensibilidade	39
4.4.4 Etapa 4 – Ajustes Sobre o Modelo	44

4.4.5 Etapa 5 – Simulação de um Ano Completo	45
4.4.6 Etapa 6 – Ajustes Finais.....	46
5 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

A simulação energética de edificações é utilizada no desenvolvimento de modelos computacionais que representem o comportamento térmico de um edifício, possibilitando estimar o consumo de energia elétrica, o qual é de grande importância em análises de alternativas de economia.

No uso de programas computacionais para avaliação das medidas de redução de consumo de energia elétrica, qualquer mudança nas cargas térmicas geradas internamente (iluminação, metabolismo de ocupantes, modo de operação dos equipamentos internos, etc) e das cargas térmicas externas (insolação, infiltração de ar e condução de calor) reflete no consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar, que também interage com as condições climáticas.

Nos últimos 30 anos, diversas ferramentas computacionais foram desenvolvidas para auxiliar na análise térmica e energética de edificações e seus componentes. O Diretório de Ferramentas de Simulação Energética (Building Energy Software Tools Directory) do Departamento de Energia dos Estados Unidos apresenta mais de 290 programas de simulação desenvolvidos em diversos países (DOE, 2005). Apesar dessa quantidade de programas existentes, o emprego de simulação energética nos escritórios de engenharia e arquitetura durante o projeto de edificações mais eficientes ainda é pouco notável. A seleção da maioria dos conceitos ou componentes energeticamente eficientes é feita durante a fase inicial do projeto e as ferramentas de simulação, quando utilizadas, são adotadas após essa fase, apenas para verificar as expectativas em relação à economia de energia ou otimizar a alternativa selecionada. Entre as principais barreiras para integração da simulação durante o projeto cita-se: a falta de confiança e clareza nos resultados fornecidos pelos programas; alto grau de experiência exigido para a correta utilização; e custos com simulação, especialmente em relação ao tempo envolvido no processo de modelagem (GOSCH et al., 2004).

A análise por simulação computacional pode ocorrer tanto na fase de projeto como após a construção da edificação. Uma das grandes vantagens da simulação de um modelo é a possibilidade de elaborar propostas de melhorias energéticas em edificações existentes (*retrofit*) sem que haja intervenções no edifício. O usuário do programa simula várias alternativas de melhoria, prevendo economia de energia elétrica, podendo ao final do processo propor a solução mais energeticamente eficiente, sem que haja necessidade de testar as alternativas na edificação.

O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) vem utilizando diversos programas de simulações de consumo de energia e estudos de *retrofit* em edifícios, na qual o programa DOE-2.1E foi utilizado em estudos por Gómez e Lamberts (1995), e Pedrini (1997). A partir de 1996, o LabEEE passou a utilizar o VisualDOE, uma interface gráfica do DOE-2.1E, criada para facilitar a entrada de dados em simulações, e compatível com sistema operacional WINDOWS (GRASSO, 1997; WESTPHAL, 1999).

Em 2001, o LabEEE começou a utilizar o programa *EnergyPlus*, desenvolvido a partir dos códigos BLAST e DOE-2, porém sem interface gráfica disponível.

Paralelamente aos estudos de economia de energia elétrica através de simulações no *EnergyPlus*, em 2003 o LabEEE iniciou o desenvolvimento de uma interface gráfica simplificada para o programa, já que o mesmo adota entrada e saída de dados apenas no formato texto. A interface, chamada E2-ArCondicionado, encontra-se em constante atualização, atualmente na versão 2.1 (LABEEE, 2005).

Como em todo programa de simulação, os modelos criados no *EnergyPlus* necessitam de uma metodologia de calibração, para se efetuar uma análise coerente de alternativas de *retrofit* sobre o caso base.

1.2 OBJETO DE ESTUDO

Este trabalho aplica uma metodologia de calibração, em desenvolvimento no LabEEE (WESTPHAL e LAMBERTS, 2005), para análise do Edifício Sede da ELETROSUL. Entre as diversas edificações para estudo na região de Florianópolis, optou-se por este prédio, porque o laboratório vem realizando análises de *retrofit* em suas instalações desde 1997 e possui acesso facilitado aos ambientes e às informações pertinentes ao estudo. Além disso, há interesse da ELETROSUL neste tipo de estudo e a proposta de *retrofit* apresentada pelo LabEEE em 2004 está em fase de licitação, por isso os resultados estimados por ferramentas de simulação poderão ser verificados *in-loco* dentro de um ou dois anos.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é aplicar uma metodologia de calibração de modelos de edificações através de simulação computacional do desempenho térmico e energético, utilizando-se análise de sensibilidade com o programa *EnergyPlus*.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este primeiro capítulo apresentou uma introdução do tema simulação energética de edificações, citando o uso e o desenvolvimento de programas computacionais em análise do comportamento térmico de edifícios no mundo, as dificuldades encontradas pelos usuários, os programas utilizados no LabEEE, o objeto de estudo, o objetivo do trabalho, além do uso de simulações na busca por melhores soluções arquitetônicas e de eficiência energética.

O segundo capítulo demonstra uma revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho, citando alguns conceitos fundamentais ao entendimento do mesmo. Descreve-se aspectos relativos à estudos de simulações anteriores, metodologia de calibração de modelos, análises de *retrofit* feitas no edifício sede da ELETROSUL, ferramentas computacionais, validação do programa utilizado.

A metodologia de trabalho consta no terceiro capítulo. Nele são apresentados uma seqüência de etapas para calibração de modelos de edificações, a caracterização do edifício estudado, histórico de consumo e demanda de energia elétrica, medições em campo, modelagem preliminar, modelos simplificados.

No quarto capítulo os resultados são expostos, através da aplicação da metodologia proposta em um estudo de caso, edifício sede da ELETROSUL. São apresentados valores de consumo de energia elétrica para o caso estudado.

As conclusões com relação ao estudo desenvolvido são apresentadas no quinto capítulo, bem como a sugestão para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

O aumento do consumo de energia é uma tendência decorrente do crescimento econômico do país e dos hábitos dos usuários que, combinado com os poucos investimentos da rede geradora de energia, culmina com o déficit no fornecimento de energia elétrica. Edificações representam aproximadamente 42% no consumo total de energia do país (LAMBERTS et al., 1997).

A simulação de protótipos vem sendo largamente utilizada principalmente pela necessidade de economia de energia elétrica, pois se pode propor soluções que demandem menos energia através do consumo estimado na simulação.

Programas de simulação permitem diagnosticar um caso real modelado e avaliar o seu desempenho quando submetido a alterações de suas características (padrão de uso, iluminação, equipamentos, condicionamento de ar, etc).

Pedrini (1997) simulou o edifício Sede da ELETROSUL no programa DOE 2.1E visando estudo de *retrofit*, onde se pôde identificar a influência das soluções adotadas, como suas melhorias. Apresentaram-se várias propostas, sendo uma delas com redução de 28% no consumo total de energia, provenientes de alterações no sistema de iluminação e troca dos resfriadores de líquido por equipamentos de maior eficiência. Embora esta solução apresente um alto investimento inicial, esta medida reduziria o gasto anual com o consumo de energia elétrica pela metade e o tempo de retorno do investimento ficaria em 2,5 anos.

A proposta de melhoria na eficiência energética do edifício sede da FIESC foi apresentada por Westphal e Lamberts (2000), conforme simulação feita em um edifício com área de 10.900m², com consumo total de energia elétrica de 1,24 GWh em 1997. Com uso final de energia elétrica distribuídos em: 50% para o sistema de iluminação, 41% para o sistema de condicionamento de ar e 9 % para os demais equipamentos elétricos, foram propostas algumas alternativas de *retrofit* no sistema de iluminação e condicionamento de ar. A avaliação energética de cada alternativa foi feita através de simulações computacionais com uso do programa VisualDOE 2.5. A alternativa de melhor desempenho proporcionaria uma redução de 42,7% no consumo anual de energia elétrica do edifício. Na conta de energia elétrica do prédio, a redução obtida seria de 66,8%.

Lee et al. (2001) realizaram simulações dos prédios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que começaram a ser ocupados em maio de 2000. O projeto dos 2 blocos respeitou conceitos de eficiência energética, visando servir de modelo para as futuras obras da UFSC. As principais medidas adotadas

para promover o uso eficiente da energia elétrica nos prédios envolveram a instalação de um sistema central de condicionamento de ar, proteções solares nas janelas, aproveitamento da iluminação natural através de prateleiras de luz e sistema de iluminação artificial composto por lâmpadas T8 de 32W, luminárias com refletor de alumínio de alta pureza e reatores com alto fator de potência. O programa VisualDOE foi utilizado como ferramenta para avaliação das alternativas depois de implantadas. O modelo dos prédios foi calibrado no programa através de medições in-loco. Alternativas de projetos, menos eficientes, adotadas nas obras típicas da UFSC foram simuladas e comparadas com o modelo calibrado a fim de se determinar a economia de energia alcançada. Na análise de alternativas de economia de energia propostas a redução do consumo anual de energia elétrica desses prédios foi de 24%. Já a redução obtida na demanda representou 64% do valor máximo registrado durante um ano. Nos sistemas de iluminação e condicionamento de ar a economia obtida equivale a 38% do consumo.

Lee et al. (2002) apresentam em detalhe a calibração do sistema de condicionamento de ar do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, feita através de medições de consumo e dos dados de catálogos dos fabricantes dos equipamentos. As simulações resultaram em valores com margem de erro de até 7,5% entre o consumo mensal simulado e medido para o sistema de condicionamento de ar e menos de 2% para os sistemas de iluminação e demais equipamentos.

Segundo Neumann e Schneider (1999), não é prático e nem econômico o uso de programas de simulação detalhados para prever o desempenho térmico e energético, enquanto seria conveniente o emprego de uma ferramenta mais genérica. Busca-se uma ferramenta eficiente de forma que a complexidade dos problemas seja reduzida sem sacrificar a precisão dos resultados. Ela deve proporcionar uma interface amigável, onde o usuário seja capaz de dominá-la em pouco tempo e que os valores de entrada sejam reduzidos aos dados mais significativos e que o tempo de simulação seja pequeno.

Ellis e Mathews (2001) desenvolveram uma ferramenta de simulação simplificada a partir do levantamento dos requisitos básicos para que o programa pudesse ser utilizado em um escritório de projeto. Entre os requisitos para o desenvolvimento do novo programa, os pesquisadores buscaram aumentar a velocidade da simulação e da apresentação dos resultados, encorajando o uso de simulação nas etapas iniciais de projeto.

O emprego da simulação para análise térmica de edificações, sejam existentes ou em fase de projeto, requer a calibração adequada do modelo de referência.

2.2 CALIBRAÇÃO DE MODELOS

A simulação do comportamento térmico de uma edificação se inicia na representação do objeto de estudo, tal qual um modelo. O modelo é uma abstração da realidade compilado segundo a linguagem de seu código de programação, e formado por centenas ou milhares de variáveis. Cada variável quantifica ou caracteriza uma característica de edificação, desde propriedades do material empregado na sua construção, à forma de operação do condicionamento de ar (PEDRINI, 1997).

Mendes (1999) relata que a calibração é uma etapa necessária e importante, pois consiste em comparar dados de desempenho real com os de simulação, com objetivo de corrigir as variáveis de entrada para melhorar a fidelidade do modelo. A quantidade de horas que os equipamentos ficam em funcionamento (*schedules*) é uma informação vital para a calibração do modelo.

Pedrini (1997) desenvolveu uma metodologia de calibração de modelos para simulação térmica e energética de edificações, utilizando como estudo de caso o Edifício Sede da ELETROSUL. Para analisar os diferentes métodos de construção e correção dos modelos e suas influências sobre os resultados das simulações, foram propostas a criação de cinco abordagens distintas:

Grupo I: O primeiro modelo da edificação é criado a partir de dados coletados à distância, foi simulado sob o arquivo climático TRY⁶ de 1963, de GOULART (1998), e seu consumo mensal simulado foi comparado com dados reais.

Grupo II: Promove o detalhamento e correções do modelo a partir de auditoria rápida realizada na edificação. Empregou-se o arquivo climático real de 1995 e dados de consumo horário total e horário para calibração do modelo. Também se beneficia das simulações anteriores para identificar as fontes de maior consumo e de maior sensibilidade sobre o modelo.

Grupo III: Concentra-se na monitoração do uso final de energia consumida em intervalos de um e dois minutos, e na caracterização dos padrões de uso das cargas não dependentes do clima, como equipamentos e iluminação em geral.

Grupo IV: É uma evolução da terceira abordagem e consiste da medição da eficiência dos resfriadores de líquido.

Grupo V: Concentra-se na caracterização da envoltória da edificação, tratando-a como um calorímetro. Este método implica na monitoração concomitante do clima e variáveis da edificação.

Pode-se avaliar vários níveis de levantamento de dados da edificação, identificando os erros e limites para a aplicação de cada método de caracterização do prédio. Verificou-se

que uma das principais variáveis que influenciam no consumo de energia elétrica da edificação é o padrão de ocupação e uso das cargas constantes e do sistema de condicionamento de ar do prédio.

A geração de modelos também é influenciada por fatores inerentes ao analista, como sua subjetividade de interpretação do caso real, a impossibilidade de obtenção de uma variável, ou ainda como particularidades dos métodos de coleta de dados e técnicas de construção do modelo. Entretanto, a principal causa de diversidade entre modelos de um mesmo caso é a combinação de dois fatores manipulados pelo analista, apresentados por Corson (1992) e Haberl et al. (1993), que consiste na relação entre a produção de resultados com maior exatidão possível e a produção de resultados com o menor custo possível. Basicamente, parte-se do princípio que quanto maior o nível de detalhamento de um caso mais fidedignos são o modelo e os resultados. Entretanto, maiores são os custos e o tempo demandado.

2.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O *EnergyPlus* é um programa computacional utilizado para realizar simulações térmicas e energéticas de um modelo de edifício, o qual foi desenvolvido sob coordenação do Departamento de Energia dos Estados Unidos (CRAWLEY et al., 2000). O programa permite, a partir da caracterização geométrica da edificação, seus componentes construtivos, cargas elétricas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso, estimar o consumo de energia considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior. Para isso, deve-se utilizar um arquivo climático da região do edifício, com dados horários de temperatura, umidade relativa, ventos e radiação solar. O *EnergyPlus* foi elaborado a partir da fusão do BLAST e DOE-2, mas seu código integra vários outros algoritmos, como WINDOW 5.0, COMIS, TRNSYS e SPARK.

O programa possui algumas inovações na capacidade de cálculo do balanço de calor, o qual pode ser detalhado em intervalos menores que 1 hora (até 1 minuto), simulação de sistemas modulares que são integrados para o cálculo do balanço de calor na zona térmica, entrada e saída de dados possibilitando a sincronização com outras interfaces. Outras possibilidades em simulações são a inclusão do fluxo de ar entre múltiplos ambientes, ou simulação de energia elétrica incluindo células combustíveis, e outros sistemas de distribuição de energia.

O usuário pode solicitar diversos tipos de relatórios do programa, com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna de cada zona

térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada ou adicionada pelo sistema de condicionamento de ar.

A entrada e saída de dados utilizam o formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), um dos códigos de caracteres mais utilizados em computadores, para representação de informações. Torna-se usual para usuários avançados a utilização de editor de texto comum para dados de entrada (*input*), e de planilha eletrônica para analisar dados de saída (*output*).

2.4 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

O método BESTEST (*Building Energy Simulation Test*), adotado pela ASHRAE como norma para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações, sob o título de ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2001) é freqüentemente utilizado como procedimento de testes e validação, pois o mesmo possui resultados de simulações de outros programas de simulação térmica de edifícios, possibilitando a comparação entre os modelos.

A validação de um programa é efetuada por meio de testes padrões (BESTEST), os quais são realizados para verificar possíveis erros do programa, constatando se a modelagem computacional representa as condições reais da edificação.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos, a validação do *EnergyPlus* foi dividida em três tipos de testes, como se pode perceber abaixo:

- a) Testes de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (HVAC), conforme o Projeto de Pesquisa 865 da ASHRAE;
- b) Testes comparativos utilizando ANSI/ASHRAE Standard 140 e IEA SHC (*International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme*) - HVAC BESTEST;
- c) Liberação e execução de outros testes

Conforme testes realizados em outubro de 2004 pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL, 2004) utilizando o método ANSI/ASHRAE Standard 140, realizou-se simulação em 18 casos, incluindo construções de baixa e alta inércia térmica, sem janelas e com janelas em diversas exposições solares, com e sem proteção solar externa, com ou sem temperaturas pré-ajustadas, com ou sem ventilação noturna, e com ou sem sistema de condicionamento de ar.

A carga anual e o pico para aquecimento e resfriamento previstos pelo *EnergyPlus* para 13 diferentes casos foram comparados com os resultados de 8 outros programas de simulação energética. O máximo e mínimo de modelos com temperaturas não controladas

(*free-floating*) foram comparados por 4 diferentes casos. A condução no solo foi comparada apenas em um caso, em virtude das limitações dos outros programas.

Baseado em 62 comparações isoladas de resultados, o *EnergyPlus* manteve-se dentro do intervalo de resultados de 8 outros programas para 58 comparações. Para os outros 4 casos que os resultados excederam os limites do intervalo, a variação foi menor que 5,6%.

Os testes de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (IEA-SHC, 2004) permitiram avaliação da capacidade do *EnergyPlus* em calcular as cargas térmicas no ambiente, cargas de resfriamento na serpentina, consumo de energia do equipamento de resfriamento. Foram simulados 14 casos incluindo variações nas condições de carga interna e externa. Os resultados previstos para os diferentes casos foram comparados com resultados de outros 7 programas de simulação energética, onde três deles foram comparados também com soluções analíticas.

O *EnergyPlus* apresentou resultados com variações menores que 1%, exceto para a taxa média de umidade, a qual foi 3% para casos com alta taxa de calor sensível, mas 0,20% para casos de baixa taxa de calor sensível.

3 METODOLOGIA

A metodologia de calibração adotada neste trabalho segue as etapas propostas por Westphal e Lamberts (2005).

O programa utilizado para todas as simulações térmicas e energéticas deste estudo foi o *EnergyPlus* (versão 1.2.1.030).

3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

O edifício Sede da ELETROSUL Centrais Elétricas S.A. foi construído em 1978, e está localizado no bairro Pantanal, na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, na latitude 27,40°S e longitude 48,33° W. É composto por 5 pavimentos, sendo 2 subsolos, com área total de 29963m². Possui cobertura com laje nervurada impermeabilizada e com forro de alumínio. Sua fachada frontal tem azimute de 118° em relação ao norte verdadeiro.

As fachadas são quase totalmente envidraçadas, com sombreamento externo, proporcionado por proteções solares de alumínio, as quais são dispostas horizontalmente e possuem ajuste manual do ângulo de inclinação, como demonstra a Figura 1 abaixo.



Figura 1 – Fachada sul do edifício Sede da ELETROSUL

A iluminação natural é proporcionada pelos domos de acrílico no vão central. Já a iluminação artificial é composta por lâmpadas fluorescentes comuns de 40W, totalizando aproximadamente 476kW de potência instalada (PEDRINI, 1997).

A potência total instalada em condicionamento de ar do prédio é igual a 940TR, sendo que a área condicionada corresponde a 20000m² (67% do total). O sistema de condicionamento de ar é do tipo central de água gelada (CAG), composta por duas

centrífugas de 420TR cada, um resfriador de líquido (*chiller*) com compressor alternativo de 100TR, bombas de água gelada e de condensação e torres de resfriamento. Existem 66 *fan-coils* distribuídos no prédio fazendo a climatização dos ambientes. Os equipamentos do sistema de condicionamento de ar não apresentam sistema de automação e o acionamento das máquinas é feito manualmente (PEDRINI, 1997).

Os fan-coils são compostos por um ventilador e uma serpentina pela qual passa água gelada ou quente. É utilizado como climatizador do ar em sistemas de expansão indireta (por exemplo CAG).

A ocupação total do prédio ocorre no período das 8 às 18h durante a semana, havendo apenas um intervalo para o almoço de 1h30, sendo que poucos equipamentos permanecem ligados durante os finais de semanas e feriados. No prédio, são desenvolvidas apenas atividades de escritório.

O prédio tem um formato quadrado de 90 x 90 m, conforme Figura 2, com um vão central de 30 x 30 m do pavimento térreo até a cobertura.

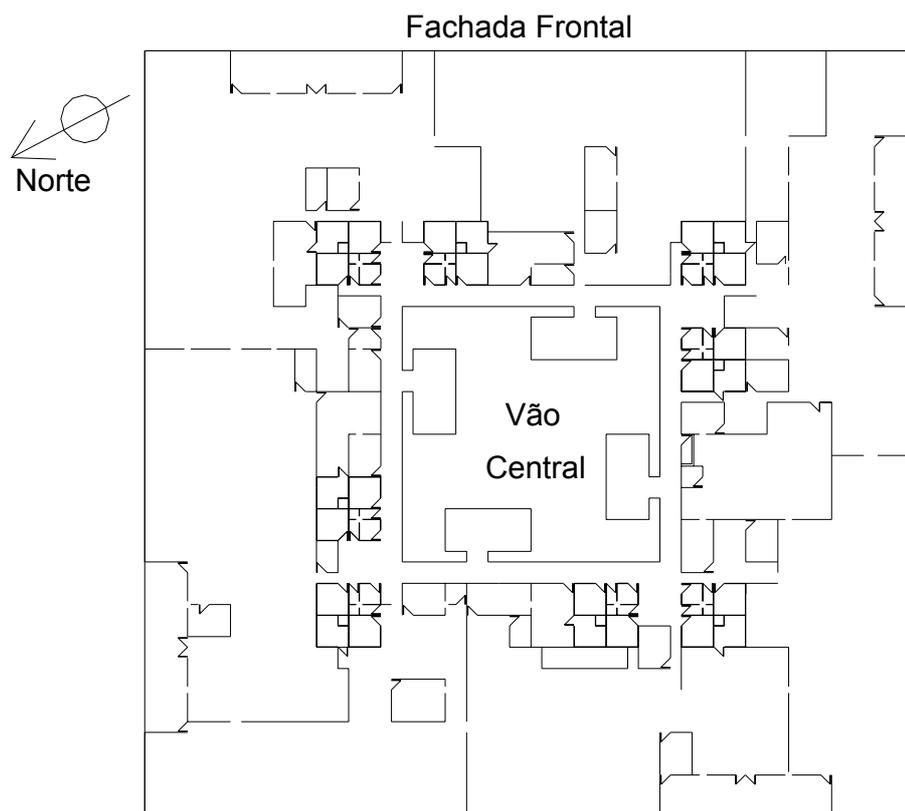


Figura 2 – Croqui em planta do primeiro pavimento do edifício

As paredes externas em concreto aparente, representam uma parcela pequena da fachada, visto que a edificação possui uma grande área envidraçada. Já as paredes internas são de compostas por divisórias de madeiras.

A ocupação do prédio é formada por aproximadamente 900 funcionários diretos, visto que existe uma grande circulação de pessoas externas.

Dentre os principais equipamentos de escritórios do edifício, pode-se citar um grande número de computadores, impressoras (jato de tinta, laser e *plotter*), copiadoras, etc.

3.2 HISTÓRICO DO CONSUMO E DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA

O histórico de consumo e demanda de energia elétrica da edificação é fundamental para o processo de calibração do modelo computacional, pois com a aquisição dos dados pode-se verificar as variações do consumo e demanda simulada com o real.

As faturas de energia elétrica de 12 meses (outubro 2003 a setembro 2004) foram adquiridas junto a ELETROSUL, com a qual se deu início a análise do consumo mensal.

Analisar apenas os valores mensais de consumo e demanda do prédio não são suficientes para afirmar se o modelo representa a edificação adequadamente. Segundo Westphal (1999) outra fonte de informação importante é a “memória de massa”. Esse termo é empregado para definir a base de dados que contém as demandas de energia do prédio, as quais são medidas em intervalos de 15 em 15 minutos. O registro dessas grandezas é comum em edifícios com tarifa horo-sazonal. As medições são feitas da seguinte maneira: o consumo de energia elétrica (kWh) do prédio é medido em intervalos de 15 minutos e o medidor de demanda determina a potência média solicitada nesse intervalo dividindo o consumo por $\frac{1}{4}$ de hora, ou seja, multiplicando por 4, obtendo assim a demanda média em kW.

Através da memória de massa obtém-se a curva de carga diária da edificação, podendo-se detectar o momento em que os sistemas ou equipamentos elétricos são acionados. A partir da análise das curvas de cargas diárias pode-se analisar as rotinas do acionamento de equipamentos de escritórios, iluminação e o sistema de condicionamento de ar.

Procurou-se obter dados de memória de massa de um período mais próximo do analisado no histórico de consumo, ou seja, da base de comparação para os resultados das simulações. A ELETROSUL forneceu memória de massa para 12 meses (setembro 2003 a agosto 2004), o qual encontra-se apenas com 1 mês de defasagem em relação ao histórico de consumo em estudo.

3.3 MEDIÇÕES EM CAMPO

A realização de medições de curva de carga e temperatura (interna e externa) no edifício permite analisar o comportamento real, verificando se as simulações estão coerentes.

O edifício possui circuitos elétricos agrupados por cargas constantes (iluminação e equipamentos) e condicionamento de ar (central de água gelada) para cada pavimento. Foram feitas medições nos seguintes locais:

- Corrente de circuitos de iluminação e equipamentos, localizados na subestação (subsolo do edifício) – 31/mai – 13/jun:
 - Pavimento 1;
 - Pavimento 2.
- Temperaturas de retorno de ar dos ambientes (um sensor para cada) – 4/jun – 11/jun:
 - Térreo (*shaft* de tomada de ar externo);
 - Pavimento 1 (salas norte e sul);
 - Pavimento 2 (salas norte e sul).

Os equipamentos utilizados foram cedidos pelo LabEEE, dos quais pode-se citar:

- Data Logger para Aquisição de Dados de Temperatura (HOBO);
- Medidor de Corrente Elétrica e Temperatura do Ar (ACR);
- Multímetro Digital Portátil (HP).

Com medições de corrente elétrica pode-se traçar curvas para análises de padrão de uso das cargas não dependentes do clima (iluminação e equipamentos). A partir das medições de temperatura pretende-se identificar a rotina de acionamento do sistema de condicionamento de ar.

3.4 MODELAGEM PRELIMINAR

3.4.1 Modelos Simplificados

A complexidade da entrada de dados para simulação energética de um edifício em um programa como o *EnergyPlus* é um fator que exige tempo e atenção do usuário. Desta forma, propõe-se que o usuário inicie as simulações com modelos simplificados, antes mesmo da definição do caso base.

Estudos de simulação anteriores realizados no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) demonstram que iniciar simulações com modelo detalhado não é recomendado. O detalhamento da modelagem de um edifício necessita dados precisos das características geométricas do prédio, padrões de uso específicos, cargas internas, sistema de condicionado de ar, iluminação e equipamentos corretamente definidos, os quais muitas vezes têm pouca influência no consumo de energia elétrica do edifício.

Outro fator que influencia na dificuldade de começar uma simulação com dados tão específicos é justamente a coleta desses dados de forma precisa. O padrão de uso por exemplo, é um dos fatores que variam freqüentemente, com forte influência por parte do usuário.

Desta maneira apresentam-se três hipóteses de geometria simplificadas, iniciando pelo modelo básico (1 zona térmica) e posteriormente para o modelo intermediário (3 zonas, sendo 2 condicionadas) e depois para o de 5 zonas (sendo que a central não é condicionada). As variáveis básicas adotadas no modelos de entrada são descritas abaixo:

- WWR (área de janela na fachada): 90% (vidro comum 3 mm)
- Brises: em todas as fachadas, adotou-se uma placa suspensa a 1,00 m da parede, com schedule de transparência de 50% ao longo do ano inteiro.
- Paredes: tijolo de 6 furos rebocado.
- Cobertura: duas lajes maciças de 10 cm com uma câmara de ar de 20 cm entre elas.
- Absortividade: 50% para paredes e coberturas
- Carga interna:
 - Iluminação: 30 W/m²
 - Equipamentos: 7 W/m²
 - Pessoas: 300 pessoas por pavimento
- Padrão de uso (schedules): para ocupação, iluminação, pessoas e ar-condicionado:
 - Dias úteis: 100% das 7h às 18h; no restante do dia, adotar 20%.
 - Feriados e finais de semana: adotar 20% ao longo das 24 horas.
- Ar Condicionado: foi utilizado um modelo de condicionador de ar através de uma macro (*heat pump*) do programa EnergyPlus, o qual foi desenvolvida para otimizar a implantação de sistemas de condicionamento de ar em quaisquer ambientes, sendo que para estudos iniciais foram definidos aparelhos de janela com capacidade dimensionada em função de cada zona térmica.

Importante salientar que entre um modelo e outro o volume total de zonas condicionadas foi o mesmo: 108.000 m³, que correspondem a 7.200 m² x 15 m de pé-direito.

O arquivo climático utilizado para simular os modelos foi o da cidade de Florianópolis.

Na composição das propriedades das superfícies utilizou-se um banco de dados de componentes construtivos típicos do Brasil, dentre eles pode-se citar:

- Parede externa e interna de alvenaria*: espessura total = 19 cm; $U = 4,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $CT = 203 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

*Composição das camadas: Parede com argamassa de emboço (2,5 cm), bloco cerâmico de 2 furos quadrados (7 cm), câmara de ar – fluxo horizontal (2 – 5 cm), bloco cerâmico de 2 furos quadrados (7 cm) e argamassa de emboço (2,5 cm);

- Piso de concreto: espessura total = 15 cm; $U = 8,95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $CT = 355 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- Cobertura (telha de fibro-cimento e laje de concreto): espessura total = 20 cm; $U = 3,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $CT = 451 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- Laje (cerâmica e piso de concreto): espessura total = 15 cm; $U = 8,95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $CT = 355 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- Vidro comum: espessura: 3 mm, Transmissividade = 0,837; Refletância = 0,075; Absortância = 0,088.

O nome “zona térmica” foi escolhido para representação térmica de um ambiente interno de uma edificação. Podendo representar uma sala ou um conjunto de salas com mesmo padrão de uso e controle de temperatura.

A hipótese “A” compreende um modelo com apenas uma zona térmica, totalmente condicionada, com formato quadrado e volume igual ao ambiente condicionado, conforme o esboço em planta, representado pela Figura 3.

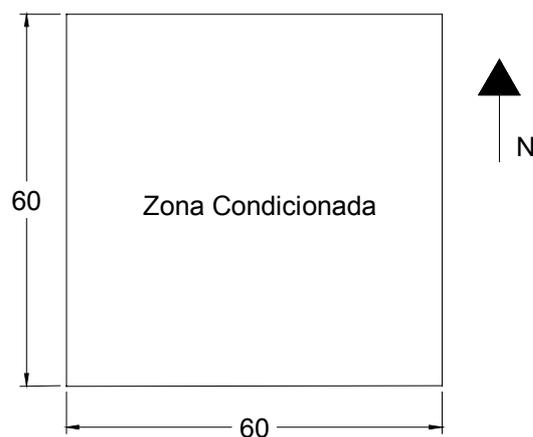


Figura 3 – Hipótese “A” – Uma zona térmica

A hipótese “B” compreende um modelo com três ambientes, sendo dois deles condicionados. Possui uma zona não climatizada que é indicado para representar edifícios com áreas longitudinais ou transversais ao prédio, como por exemplo, corredores.

A Figura 4 representa um esboço do modelo proposto para a hipótese “B”.

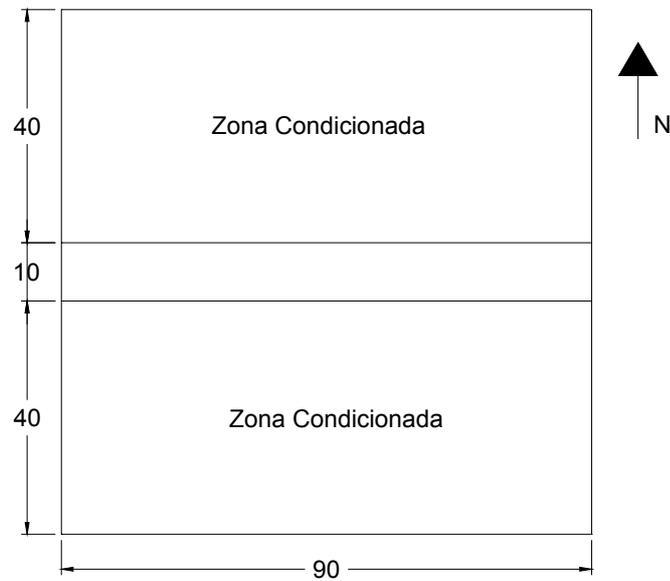


Figura 4 – Hipótese “B” – Três zonas térmicas

A hipótese “C” representa um modelo com cinco ambientes, sendo quatro deles condicionados. Possui uma zona central não climatizada que é indicado para representar edifícios com áreas centrais, como por exemplo, escadas.

A Figura 5 demonstra um esboço do modelo proposto para a hipótese “C”.

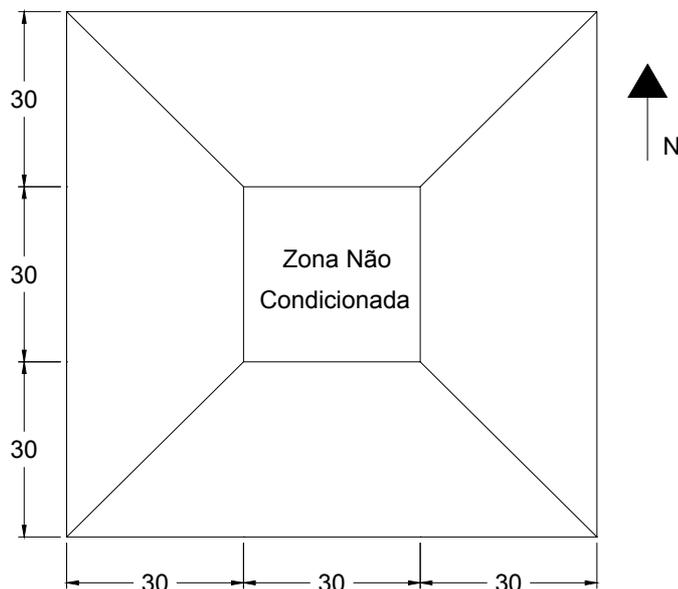


Figura 5 – Hipótese “C” – Cinco zonas térmicas

3.4.2 Programação da Entrada de Dados Geométricos

O *EnergyPlus* reconhece que uma superfície plana qualquer (parede, piso, teto, janela) é representada por quatro vértices, sendo que cada um possui três coordenadas (x,y,z). Por ser um processo repetitivo, na geração de coordenadas dos vértices de cada

superfície foi utilizada uma linguagem de programação (VisualBasic em ambiente Microsoft Excel) para agilizar o processo, aumentando significativamente a velocidade de inserção da geometria em uma modelagem no EnergyPlus.

Na programação da macro criou-se a opção das três hipóteses básicas de geometrias descritas acima, restringindo a entrada de dados em apenas 7 itens: comprimento, largura, pé-direito, profundidade da zona, número de andares, zonas por andar, área de janelas na fachada.

Definidos os 7 parâmetros de entrada, executa-se a macro, a qual gera um arquivo tipo padrão do *EnergyPlus* (.idf), contendo todas as coordenadas da geometria desejada, podendo ser facilmente editado na interface básica (IDF-Editor) do programa.

3.5 CALIBRAÇÃO

Calibração pode ser definida como uma comparação das indicações de um instrumento padrão a fim de corrigir-lhe os erros. Neste trabalho, considera-se que um modelo calibrado é o qual representa os comportamentos térmico e energético de uma edificação com precisão desejada.

A Figura 6 demonstra o fluxograma do método de calibração utilizado, que será descrito a seguir.

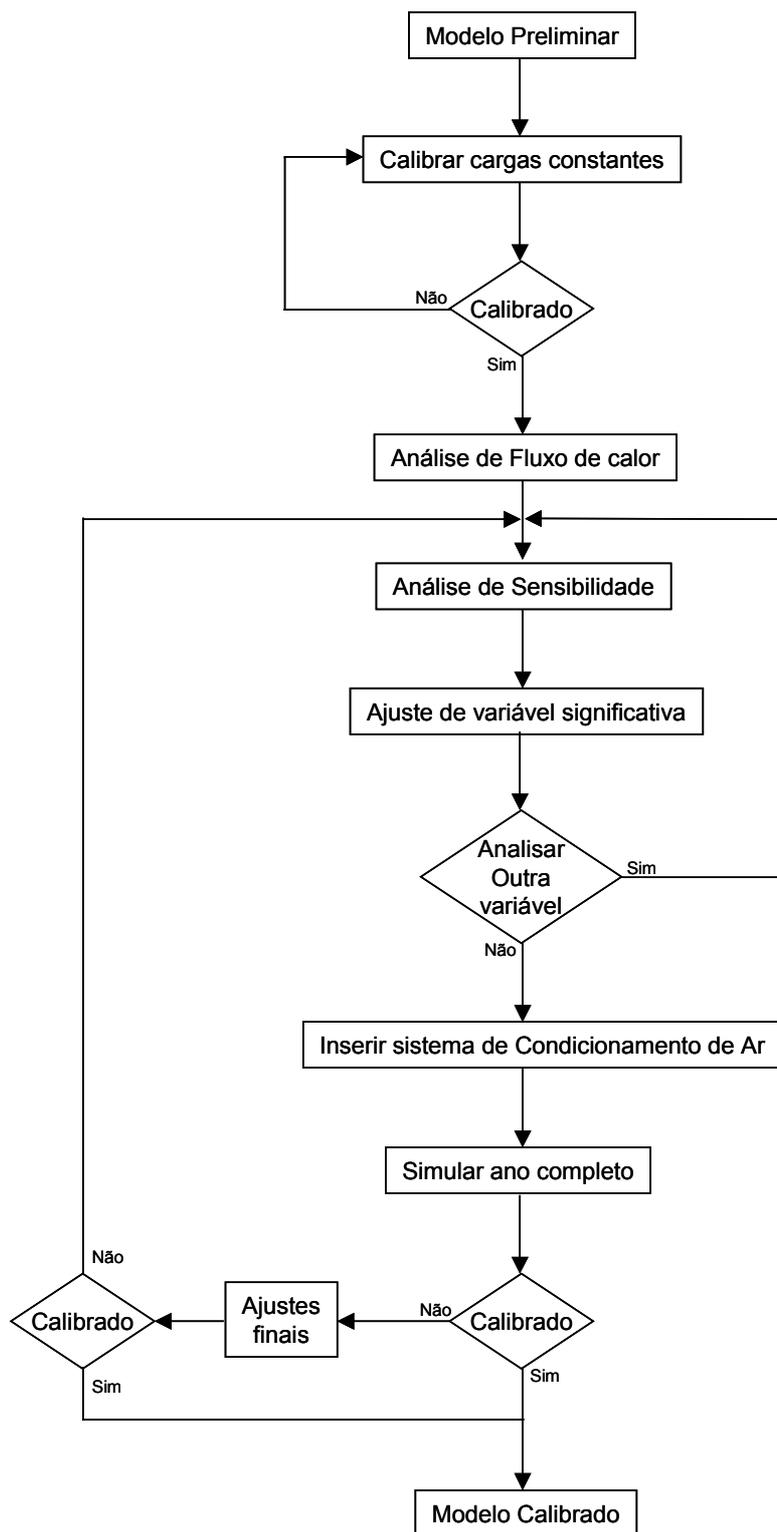


Figura 6 – Fluxograma da metodologia de calibração

A metodologia definida por Westphal e Lamberts (2005) apresenta uma seqüência de etapas para a calibração de um modelo de edifício, onde se sugere que o usuário inicie o processo de simulação através de um modelo básico (mínimo de variáveis), o qual será

progressivamente refinado (inclusão de variáveis detalhadas) no decorrer das etapas, até o momento em que se possa estimar o consumo da edificação com o grau de precisão desejado.

O procedimento é proposto para minimizar o longo tempo gasto na calibração de um modelo durante a simulação computacional, sendo apresentado em 6 etapas.

A primeira etapa consiste em representar as cargas constantes, sem dependência do clima externo (iluminação e equipamentos), e seus padrões de uso em uma geometria qualquer.

Com a iluminação e equipamentos calibrados no modelo, inicia-se a segunda etapa, a qual consiste na análise de fluxo de calor nos dias de projeto, onde se caracterizam o envelope (geometria, janelas, proteção solar, orientação solar) e o sistema de condicionamento de ar fictício, o qual o *EnergyPlus* chama de “purchased air”. Nesta etapa o período de simulação necessário compreende apenas os dias típicos ou de pico de carga, para inverno e verão.

O próximo passo é direcionado para análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada com trocas de calor significativas, ou seja, a análise é aplicada para verificar o grau de influência que os dados de entrada (*input*) provocam no consumo de energia elétrica do condicionamento de ar do modelo (*output*), para um dia típico.

Na quarta etapa, as variáveis de maior influência e incertezas são analisadas detalhadamente, ajustando os parâmetros de grande importância no comportamento térmico do modelo.

Na etapa seguinte, substitui-se o sistema de condicionamento de ar fictício pelo real, simulando o modelo para todos os dias do ano.

A última etapa é reservada para ajustes finais, da qual obtém-se o modelo calibrado.

A necessidade de simular modelos para todos os dias do ano ocorre apenas nas últimas etapas, o que reduz o tempo gasto em modelos preliminares, já que o período de simulação e o detalhamento do modelo são diretamente proporcionais ao tempo que o programa gasta na simulação.

O arquivo climático, utilizado para todas as análises deste trabalho, contém dados da região de Florianópolis e é do tipo TRY (*Test Referency Year*) de 1963, o qual inclui dados horários de temperatura, umidade relativa, ventos e radiação solar. Os arquivos climáticos devem conter, preferencialmente, dados do mesmo ano da simulação, porém para este trabalho, o período simulado (2005) não corresponde ao ano do arquivo climático simulado (1963), o que pode não representar corretamente a realidade climática atual, gerando imprecisões nos resultados.

3.5.1 Etapa 1 – Calibração de Cargas Constantes

A primeira etapa consiste na calibração mensal de energia elétrica consumida por cargas de consumo constante, sem dependência do clima. Uma inspeção rápida com base em auditoria no edifício, plantas e documentos referentes ao edifício é o necessário para aquisição da potência de iluminação e equipamentos, bem como seus horários de funcionamento. Através destas informações preliminares caracteriza-se o modelo inicial da primeira etapa.

Nesta fase, pode ser inserida uma geometria genérica (qualquer) no programa, visto que as cargas constantes não sofrem influência do envelope, ou seja, o consumo das mesmas não depende das variações climáticas na simulação deste modelo.

O consumo das cargas constantes representará apenas uma parcela do consumo total da edificação. Outra verificação importante a ser feita nesta fase é a comparação da curva de carga de um dia típico de inverno (real x simulado) com pouco ou nenhum uso de condicionamento de ar, de acordo com memória de massa ou medições na edificação.

Através dessa comparação pode-se ajustar o padrão de uso dessas cargas e o valor de potência instalada adotado no modelo, representando a segunda modelagem da primeira etapa.

Devem ser simulados quantos modelos forem necessários para atingir o grau de precisão desejado.

3.5.2 Etapa 2 – Análise dos Fluxos de Calor

Com a iluminação e equipamentos calibrados, inicia-se a segunda etapa, a qual consiste na análise de fluxo de calor nos dias típicos, onde o sistema de condicionamento de ar fictício é inserido, o qual o *EnergyPlus* chama de “purchased air”..

Conforme o tutorial do programa (ENERGYPLUS, 2005), “purchased air” é caracterizado por uma unidade de insuflamento de ar forçado em uma determinada zona térmica, o qual é usado em situações onde o usuário deseja analisar o desempenho de um edifício com um sistema ideal.

Um sistema ideal é definido como um equipamento que possui eficiência infinita, ou seja, a medida que o ambiente demanda ar resfriado ou aquecido, o sistema imediatamente retira ou adiciona calor sem limites, insuflando a quantidade necessária para manter o ambiente de acordo com seu padrão de uso e temperaturas de controle.

Nesta etapa, as cargas térmicas, que serão calculadas pelo programa, dependerão também do envelope, sendo necessário definir a geometria básica do edifício.

Conforme as análises de hipóteses simplificadas realizadas anteriormente, pode-se definir qual geometria mais se assemelha com o edifício. As características arquitetônicas a serem inseridas neste nível foram: comprimento, largura, pé-direito, profundidade da zona, número de andares, zonas por andar, área de janelas nas fachadas.

A análise dos fluxos de calor consiste em identificar quais dos componentes representam maior ganho de calor no modelo. Dentre os componentes básicos pode-se citar:

- a) Janelas (ganho de calor solar transmitido, absorvido e conduzido devido a diferença entre a temperatura externa e interna das superfícies);
- b) Paredes (ganho ou perda de calor por condução devido a diferença entre a temperatura externa e interna das superfícies);
- c) Cobertura (condução);
- d) Piso (condução);
- e) Equipamentos;
- f) Iluminação;
- g) Ocupação;
- h) Infiltração (ganho e perda de calor devido ao ar exterior infiltrado no edifício).

Os fluxos de calor são computados em valores absolutos. No fluxo total de calor através das janelas, por exemplo, serão considerados os ganhos de calor durante as horas de insolação mais o valor absoluto da perda de calor durante a noite.

Nesta etapa, a carga total de resfriamento e aquecimento é calculada para o modelo analisando-se os dias de projeto de inverno e verão. O fluxo total de calor para cada fonte é integrado através do dia de projeto.

As fontes de calor mais significativas deverão receber uma atenção especial na terceira etapa do procedimento de calibração, durante a análise de sensibilidade.

3.5.3 Etapa 3 – Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é aplicada para verificar o grau de influência que os dados de entrada (*input*) provocam no consumo de energia elétrica do condicionamento de ar do modelo (*output*), para um dia típico do ano. Consiste em modificações nos valores de entrada para cada variável. A influência de cada parâmetro é calculada através da Equação 1 abaixo, que representa o “Coeficiente de Influência” (Lam e Hui, 1996).

$$CI = \frac{\Delta OP \div OP_{CB}}{\Delta IP \div IP_{CB}} \quad [1]$$

Onde ΔOP e ΔIP são as variações dos dados de saída e entrada, respectivamente, e OP_{CB} e IP_{CB} são valores de saída e entrada do caso base. Este coeficiente de sensibilidade é adimensional e representa o percentual de variação nos dados de saída devido ao percentual de alteração aplicado nos dados de entrada.

Os parâmetros são listados pelo coeficiente de influência, em ordem decrescente, onde os primeiros serão o foco de próximos ajustes, quando necessários. Provavelmente, nem todas as variáveis serão ajustadas, mas a análise identifica qual o grau de influência de cada uma no modelo. A análise de sensibilidade é usual para guiar o usuário nesse tipo de procedimento, onde o modelo é progressivamente refinado.

As variáveis são obtidas através de inspeção *in-loco* ou por meio de plantas, relatórios, entrevistas, entre outros. Os parâmetros analisadas por fonte de calor são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Componentes de fluxo de calor e variáveis de entrada

Fontes de calor	Dados de entrada
Janelas	dimensões da janela – WWR (função do pé-direito) espessura do vidro Transmissividade + Absortância do vidro (Ts+Abs) proteção solar externa
Paredes	dimensões (área total e azimute) transmitância térmica (U) capacidade térmica absorção de ondas curtas
Cobertura	dimensões (área total e azimute para telhados inclinados) transmitância térmica (U) capacidade térmica absorção de ondas curtas
Piso	dimensões (área total) subsolo transmitância térmica (U) capacidade térmica
Equipamentos	potência padrão de uso
Iluminação	potência padrão de uso
Ocupação	quantidade taxa metabólica padrão de uso
Infiltração	taxa de infiltração com rotina

3.5.4 Etapa 4 – Ajustes Sobre o Modelo

Os parâmetros de maior influência e incertezas, identificados na fase anterior, receberão maior atenção nesta etapa.

Caracterizar estas variáveis, o mais próximo do real, é um fator importante para garantir que grande parte dos fluxos de calor de maior consumo no edifício, estará bem representada.

Uma inspeção no edifício pode esclarecer informações relevantes para a representação do modelo no *EnergyPlus*. Entrevistas com usuários e à equipe de manutenção do prédio também podem colaborar para ajustar parâmetros do modelo que exercem forte influência no consumo de energia elétrica.

A necessidade de executar a simulação para esta etapa é opcional, já que os ajustes feitos condizem mais com a realidade do edifício neste modelo do que no anterior.

3.5.5 Etapa 5 – Simulação de um Ano Completo

Após os ajustes feitos na etapa 4, a calibração é feita para a simulação de um ano completo. A análise poderá ser horária, mensal ou anual, sendo que os resultados devem apresentar variação máxima (em módulo) de 20% mensal e 5% anual. Caso esses valores sejam ultrapassados, o usuário deverá voltar para a terceira etapa do método (WESTPHAL, 2005).

O sistema de condicionamento de ar fictício é substituído pelo sistema real da edificação, para o qual deverá ser especificado sua capacidade máxima e eficiência.

Nesta etapa é possível obter o consumo de energia elétrica por uso final no prédio, e traçar o perfil de consumo mensal.

3.5.6 Etapa 6 – Ajustes Finais

A última etapa é reservada para ajustes específicos, onde o modelo dá-se por calibrado, e quando análises de *retrofit* podem ser iniciadas.

Se o consumo mensal ou anual estimado pelo modelo estiver muito diferente do real, pode-se voltar à etapa 3 da calibração.

4 RESULTADOS

A metodologia descrita acima foi aplicada na simulação do edifício Sede da ELETROSUL no programa *EnergyPlus*. Os resultados obtidos em cada etapa da calibração são apresentados abaixo.

4.1 HISTÓRICO DO CONSUMO E DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA

A Figura 7 demonstra o consumo de energia elétrica mensal, em MWh, registrado no período de outubro 2003 a setembro 2004. Esses valores foram utilizados como base para calibração do modelo.

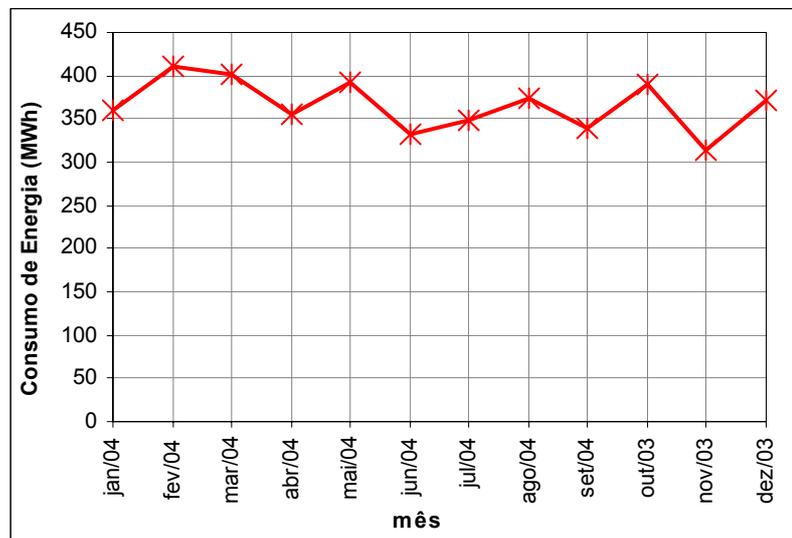


Figura 7 – Consumo de energia elétrica mensal – Sede ELETROSUL, out/03-set/04

Percebe-se que a Sede ELETROSUL possui um alto consumo de energia, cerca de 4,4 GWh ou 146 kWh/m² por ano, justificando os estudos de simulação computacional, pois uma pequena alteração localizada, pode representar grande economia ou desperdício de energia elétrica.

Analisar apenas os valores mensais de consumo do prédio não são suficientes para afirmar se o modelo representa a edificação adequadamente. Com isso, analisou-se também a demanda de energia elétrica registrada pela concessionária.

No tratamento dos dados de memória de massa, traçam-se curvas de carga diárias, para cada mês, as quais fornecem informações importantes na identificação do comportamento dos sistemas de energia elétrica do edifício. Dos gráficos gerados, pode-se analisar os horários de acionamento da iluminação, equipamentos e condicionamento de ar, e as cargas constantes durante dias úteis e finais de semana.

Como exemplo, na Figura 8 demonstra-se a composição de cargas horárias em kW, na semana de 12 a 18 de outubro 2003, representando um período típico de verão.

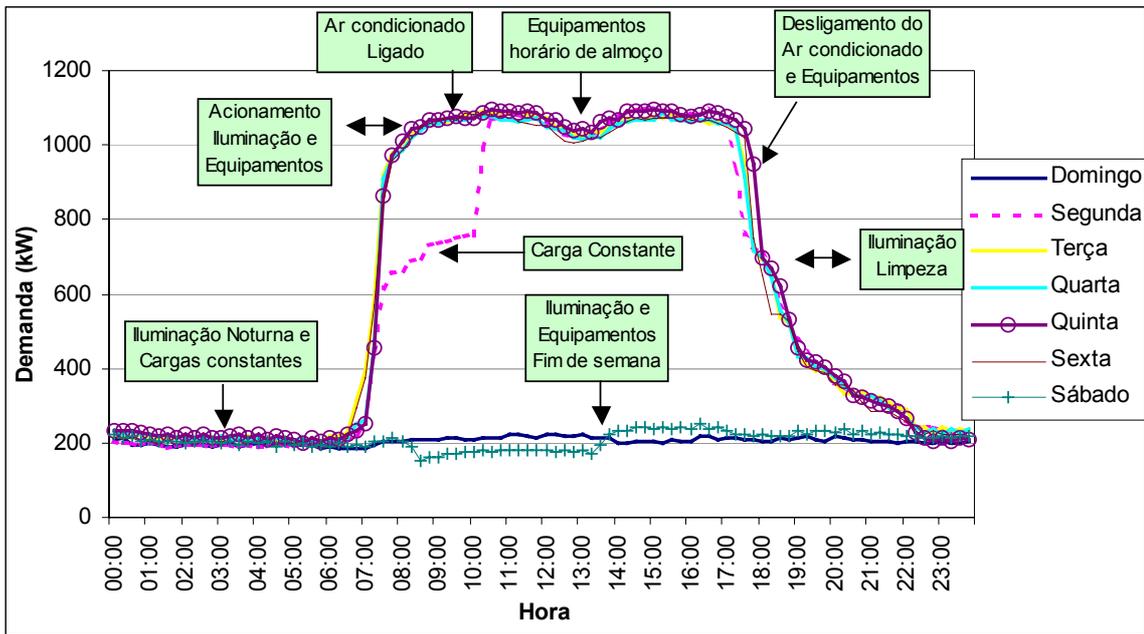


Figura 8 – Composição de cargas diárias – verão (12 a 18 outubro)

Como exemplo, na Figura 9 demonstra-se a composição de cargas horárias em kW, na semana de 23 a 29 de dezembro 2003, representando um período típico de inverno. Pode-se perceber que o sistema de condicionamento de ar é acionado, seja parcialmente ou totalmente, no período de inverno, geralmente após as 10h da manhã.

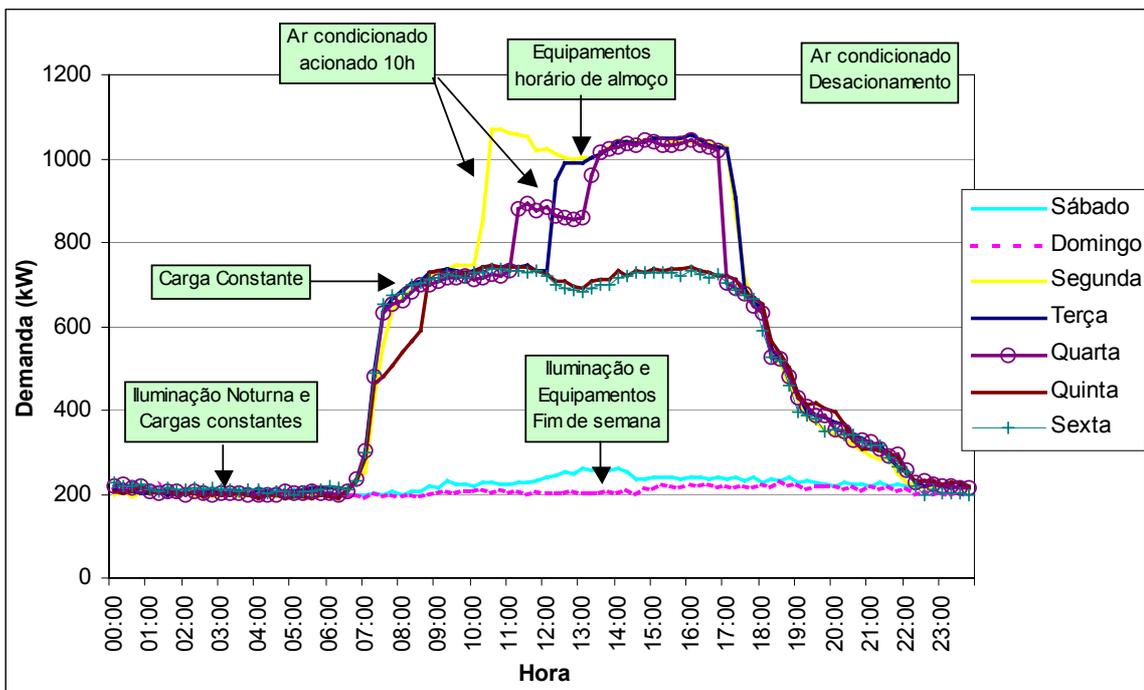


Figura 9 - Composição de cargas diárias – inverno (23 a 29 jul)

Este tipo de análise contribuiu na calibração do padrão de uso e da carga instalada por uso final.

4.2 MEDIÇÕES EM CAMPO

A Figura 10 demonstra a medição de corrente elétrica realizada na subestação do prédio, localizada no subsolo, a qual foi realizada entre os dias 31 de maio e 3 de junho de 2005.



Figura 10 – Medição de Corrente Elétrica – 31/mai a 3/jun

Conforme medições de corrente e temperatura que foram realizadas no edifício, pode-se traçar curvas horárias de demanda e temperatura, permitindo conhecer melhor o comportamento das instalações.

A Figura 11 colabora no entendimento do comportamento térmico da edificação, na qual percebem-se vários pontos importantes. Dentre eles, cabem citar:

- a) Variação na temperatura do Pavimento 2 durante finais de semana, devido a exposição da cobertura à radiação solar;
- b) Temperatura dos ambientes condicionados variando entre 22,5 e 25°C;
- c) Tomada de ar apresentando senóide característica de temperatura externa.

As temperaturas de orientações opostas de mesmo pavimento apresentaram valores semelhantes. Com isso decidiu-se apresentar a média das temperaturas.

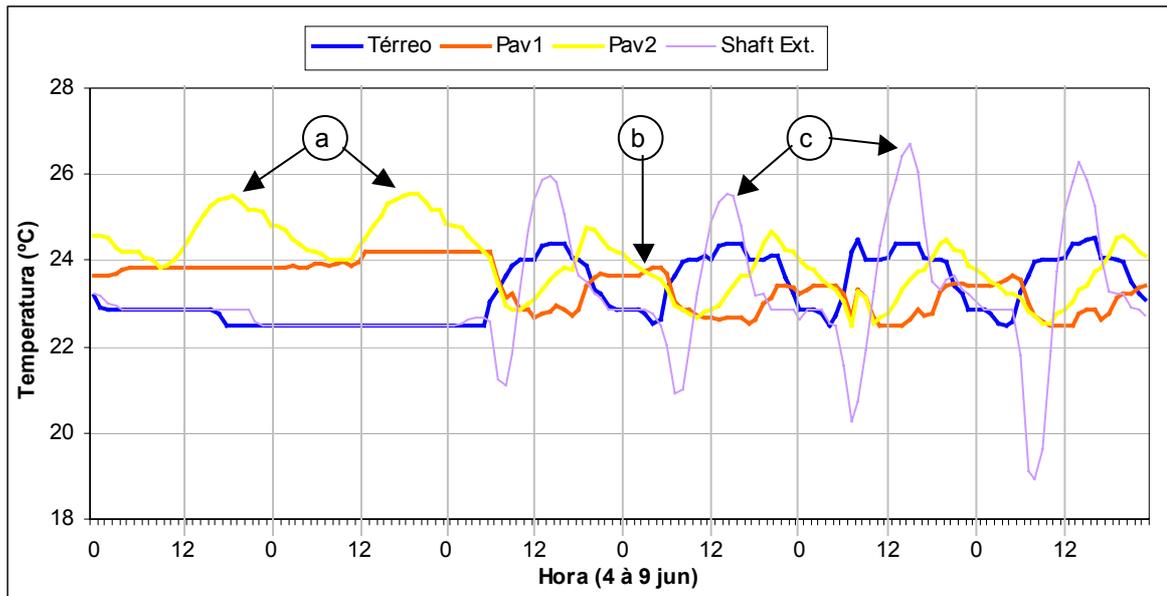


Figura 11 – Temperaturas (4 a 9 junho)

Pode-se perceber que o pico de temperatura interna no pavimento 2 ocorre geralmente às 18h, provavelmente em virtude do atraso térmico da cobertura, visto que às 15h a temperatura externa atinge seu máximo.

De forma análoga, pode-se verificar o comportamento das temperaturas para o dia 4 de junho, conforme Figura 12.

No pavimento térreo percebe-se o aumento de temperatura a partir do nascimento do sol, estabilizando em 24°C durante o período da manhã, excedendo meio grau à tarde e reduzindo a noite. No térreo não existem proteções externas, pois o mesmo possui recuo dos pavimentos tipos (1 e 2). Os pavimentos 1 e 2 têm comportamento semelhante no período da manhã, devido à tomada de ar externo (*shaft*) contribuir para retirada de carga térmica no início do período da manhã, ao insuflar ar frio para os ambientes.

Carga térmica pode ser definida como a quantidade de energia em forma de calor inserida ou retirada do ambiente para mantê-lo a uma temperatura controlada (*set-point*).

No início do período da manhã o sistema de condicionamento de ar é ativado juntamente com as bombas hidráulicas, o que indica que no começo do dia o sistema é favorecido pela ajuda dos 4 *shafts* de tomada de ar externo, mantendo os ambientes na temperatura adequada, mesmo quando a água gelada ainda não atingiu a temperatura necessária para resfriamento dos ambientes.

No decorrer do dia, a temperatura externa aumenta e o sistema de condicionamento de ar não consegue acompanhar esta evolução de carga, e a temperatura interna tende a subir.

No pavimento 2, ao final do dia percebe-se um pico de temperatura, provavelmente oriundo dos ganhos de calor pela cobertura.

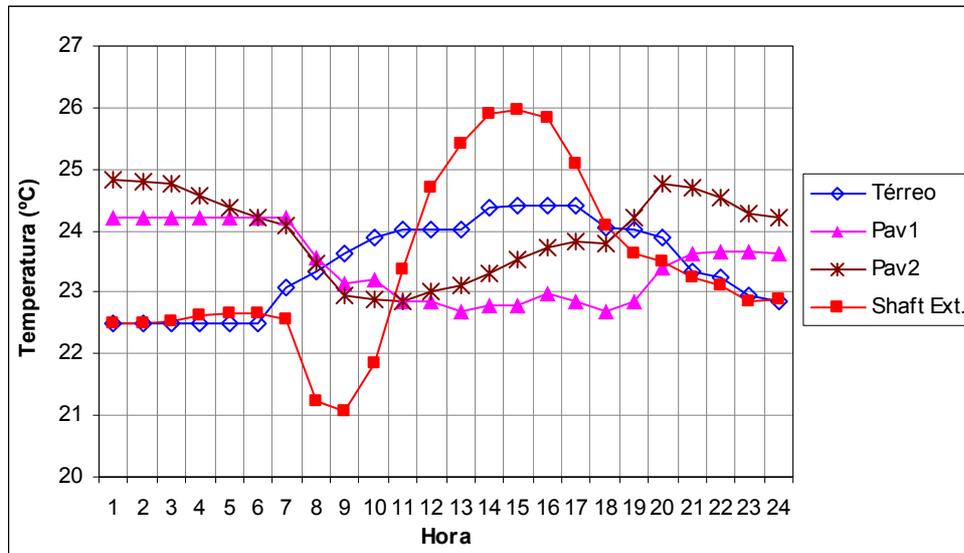


Figura 12 – Temperatura – 4/jun

Estes gráficos de temperaturas medidas podem ser comparados com temperaturas simuladas de cada modelo, para verificar o comportamento do modelo diante da realidade.

A Figura 13 demonstra medições realizadas em dois circuitos de corrente elétrica nos dias 1 e 2 de junho de 2005.

Estas curvas ajudaram a definir quando os equipamentos e sistema de iluminação são ligados ou desligados pelo usuário. No primeiro dia pode-se verificar que alguns equipamentos e a iluminação foram ativados às 7h30 sendo parcialmente desligado às 19h, posteriormente às 22h e 24h, onde foram totalmente desligados. Esse retardo no desligamento pode indicar as faxineiras trabalhando ou alguma reunião localizada.

No pavimento 1, após às 18h provavelmente utilizou-se alguma sala para reuniões, ou outro tipo de ocupação após o horário de expediente.

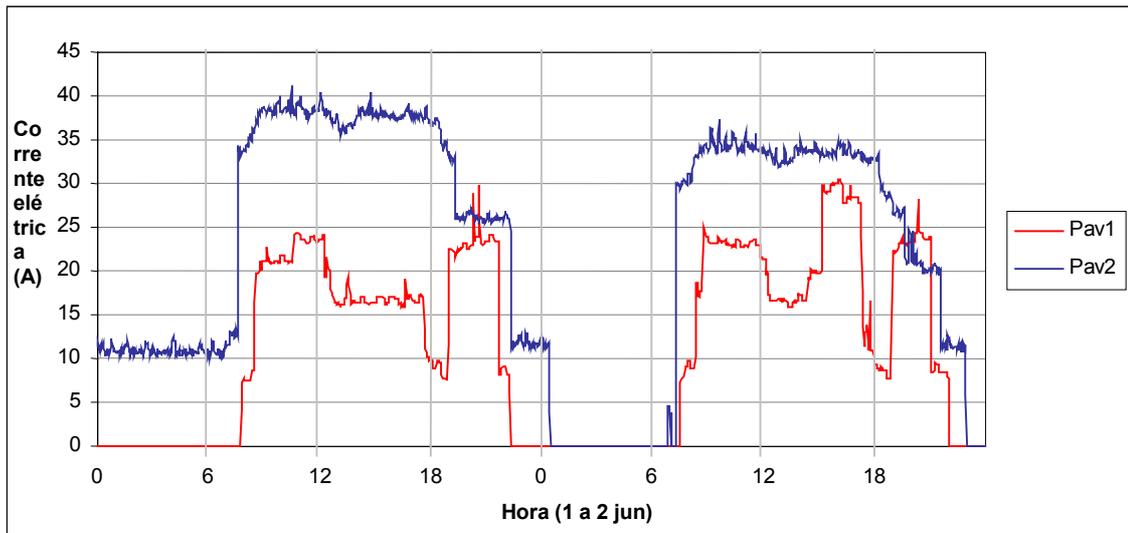


Figura 13 – Corrente elétrica (1 a 2 junho)

A dificuldade de aquisição de dados de energia elétrica levantada em campo é comum, pois muitos prédios não apresentam circuitos separados por uso final ou pavimentos. Na medição dos circuitos elétricos pretendia-se medir o sistema de condicionamento de ar, porém os medidores utilizados não foram suficientes para envolver as barras de condução de energia, impossibilitando tal leitura.

4.3 MODELAGEM PRELIMINAR

4.3.1 Modelos Simplificados

Através da simulação de modelos simplificados concluiu-se que, dependendo do modelo, as variações de consumo total de energia elétrica, utilizando um aparelho de janela na representação do sistema de condicionamento de ar, são pequenas entre as hipóteses um, três ou cinco zonas, apresentando valores máximos de 4%, conforme a Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Variação do Consumo total anual entre os três modelos testados

Tipo	Real	1 zona	3 zonas	5 zonas
Consumo total [MWh]	4.385	4.195	4.347	4.544
Variação	-	4%	1%	-4%

A Figura 14 demonstra o resultados da análise para a Sede ELETROSUL, o qual pode-se perceber a pequena dispersão entre as hipóteses testadas.

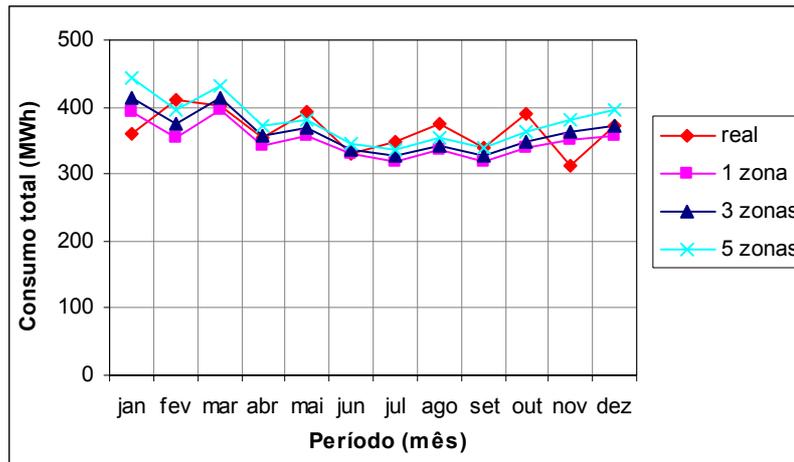


Figura 14 – Consumo de Hipóteses simplificadas – real x simulados

A Figura 15 apresenta as variações de consumo total de energia elétrica entre as hipóteses simplificadas em estudo.

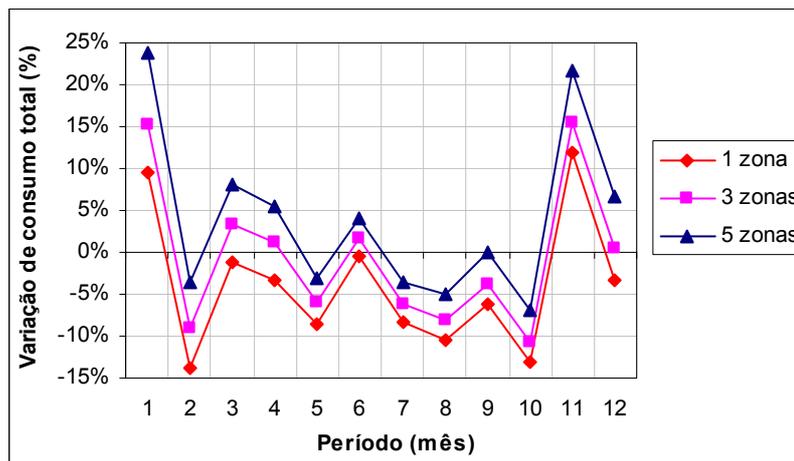


Figura 15 – Variação de consumo total

Embora o consumo anual apresente pequena variação (máxima de 4%), o mensal demonstra dispersões de até 25%. Sendo assim, para definir o modelo simplificado mais adequado para representar o edifício como um todo, procurou-se identificar qual das três hipóteses tem maior semelhança geométrica com a edificação real. Neste caso, a configuração com 5 zonas foi escolhida para representar a edificação real.

4.4 CALIBRAÇÃO

4.4.1 Etapa 1 – Calibração de Cargas Constantes

A caracterização das cargas constantes (iluminação e equipamentos) e suas rotinas de utilização (padrão de uso) em um modelo computacional são geralmente tarefas que demandam dados específicos do edifício e de seus usuários.

Nestas condições procura-se adquirir dados através de um levantamento rápido do prédio. A primeira alternativa é o levantamento no local, porém constatou-se que o LabEEE possui um levantamento de luminárias e equipamentos, realizado em outubro de 2004, para fins de análise de *retrofit*, o qual fornecia as potências apresentadas abaixo. O relatório descreve que os valores para equipamentos foram estimados, tanto suas potências como a quantidade, gerando certa imprecisão (LABEEE, 2004).

A Tabela 3 demonstra o somatório das potências de iluminação e equipamentos, em kW para cada pavimento da Sede da ELETROSUL.

Tabela 3 – Potência de Iluminação e Equipamentos

Pavimento	Iluminação		Equipamentos		Total (W)
	Potência (W)	Densidade W/m ²	Potência (W)	Densidade W/m ²	
Sub-solo	34.067	4,2	850	0,1	34.921
Intermediário	13.488	1,7	2.120	0,3	15.609
Térreo	67.673	8,4	28.980	3,6	96.661
1º pvto	183.983	22,7	58.660	7,2	242.665
2º pvto	132.048	16,3	18.000	2,2	150.064
Total	431.257	10,6	108.610	2,7	539.920

Nesta fase, pode ser inserida uma geometria genérica (qualquer) no programa, já que as cargas constantes não sofrem influência do envelope na simulação do consumo.

No caso da modelagem dos pavimentos de subsolo, decidiu-se por agrupar os pavimentos enterrados (Subsolo + Intermediário) representando-os geometricamente em um único andar, já que os mesmos representam uma pequena parcela da potência total do prédio (cerca de 9%), tornando desnecessário um detalhamento em dois pavimentos. As potências de iluminação e equipamentos foram distribuídas uniformemente nos quatro pavimentos do modelo.

As correções da modelagem são feitas a partir da comparação da curva de carga de um dia típico do ano, o qual é comparado com o mesmo dia retirado da memória de massa.

Como o sistema de condicionamento de ar do edifício não é operado no inverno, procura-se escolher um dia que se enquadre neste período, pois este irá representar apenas as cargas constantes do edifício, as quais podem ser diretamente comparadas com os resultados simulados, verificando se a caracterização está de acordo com a realidade. O dia

escolhido para a devida análise foi 29 de agosto de 2003, no qual não houve acionamento do sistema de condicionamento de ar. Percebeu-se também, que na maioria dos dias do período de inverno o condicionamento de ar é acionado, embora seja geralmente a partir das 10h da manhã, podendo ser parcialmente ou totalmente acionado, de acordo com a necessidade dos funcionários.

Nesta etapa foram simulados dois casos, denominados de “1a” e “1b”. No primeiro modelo (1a) adotou-se apenas um padrão de uso para iluminação e equipamentos, o qual foi definido totalmente ativado das 8 às 18h nos dias úteis e 20% acionado para o resto do tempo. A Figura 16 demonstra a análise diária da primeira etapa, para o modelo 1a.

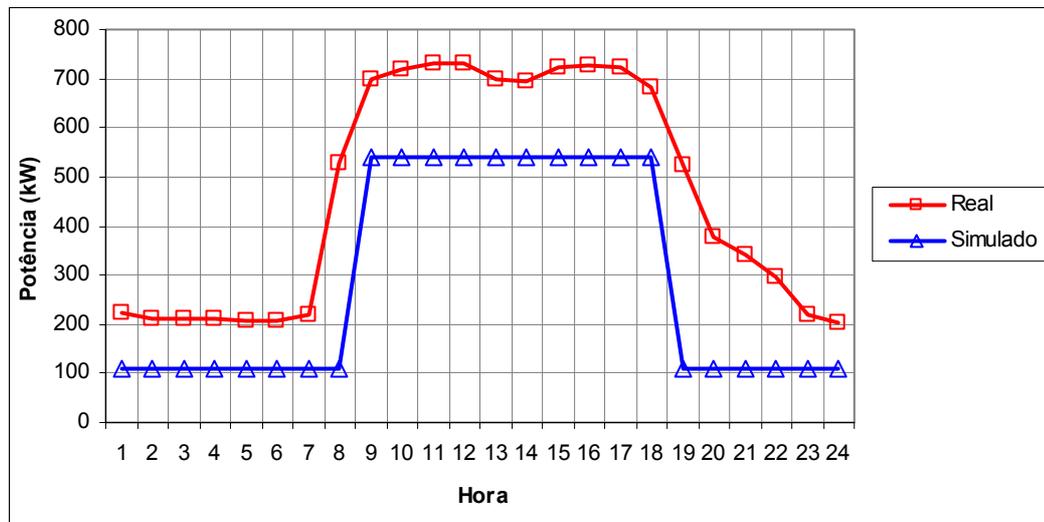


Figura 16 – Etapa 1a – Potência - 29/ago

Pode-se verificar que o consumo estimado permanece inferior ao real em todas as horas do dia, necessitando uma análise mais detalhada nos padrões de uso e principalmente na potência dos equipamentos, os quais receberam uma atenção especial no modelo 1b.

A diferença de consumo é provavelmente proveniente de outros equipamentos não contabilizados na pesquisa realizada anteriormente.

Na segunda modelagem (1b), além dos padrões de uso serem separados para cada grupo de uso final, realizou-se um estudo com base nos dados de memória de massa.

Os dados de consumo apresentados da memória de massa para uma semana de inverno, cujo sistema de condicionamento de ar encontra-se desativado, foram utilizados na calibração detalhada dos padrões de uso de iluminação e equipamentos.

Estimou-se o quanto o consumo horário representa do máximo diário, e posteriormente agrupou-se os mesmos por períodos (por exemplo: manhã, tarde, noturna), simplificando a entrada de dados no *EnergyPlus*.

A Figura 17 demonstra graficamente esta análise, para o dia típico de inverno.

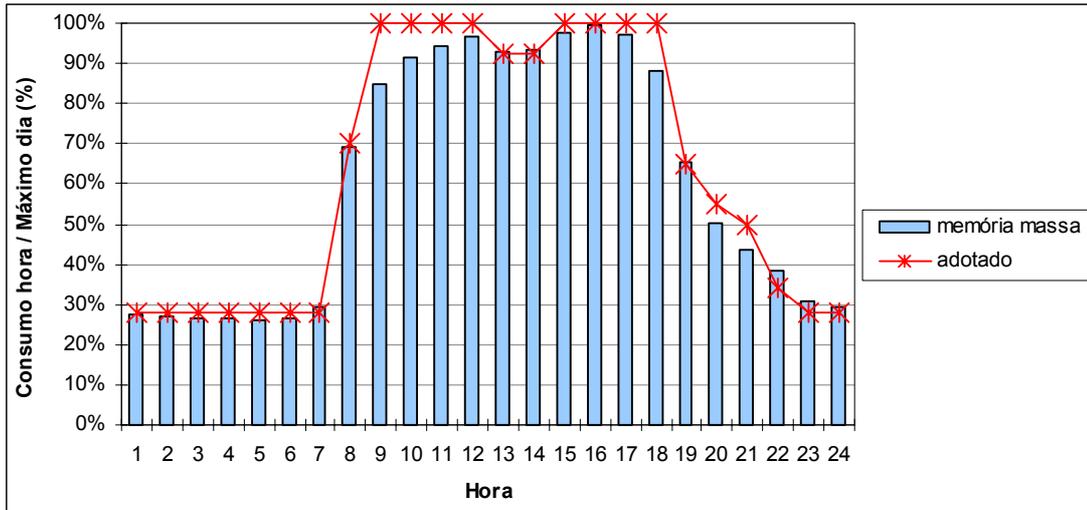


Figura 17 – Ajuste do padrão de uso conforme memória de massa

Com base na curva gerada através dos dados da memória de massa, os padrões de uso foram representados de acordo com a Figura 18.

No período noturno foram modificados os índices que representam o percentual de equipamentos ou luminárias ligadas, de 20% para 28% para ambos os usos, e durante o almoço de 100% para 85% devido à redução provocada pela ausência e conseqüentemente à desativação de alguns equipamentos, especialmente os monitores.

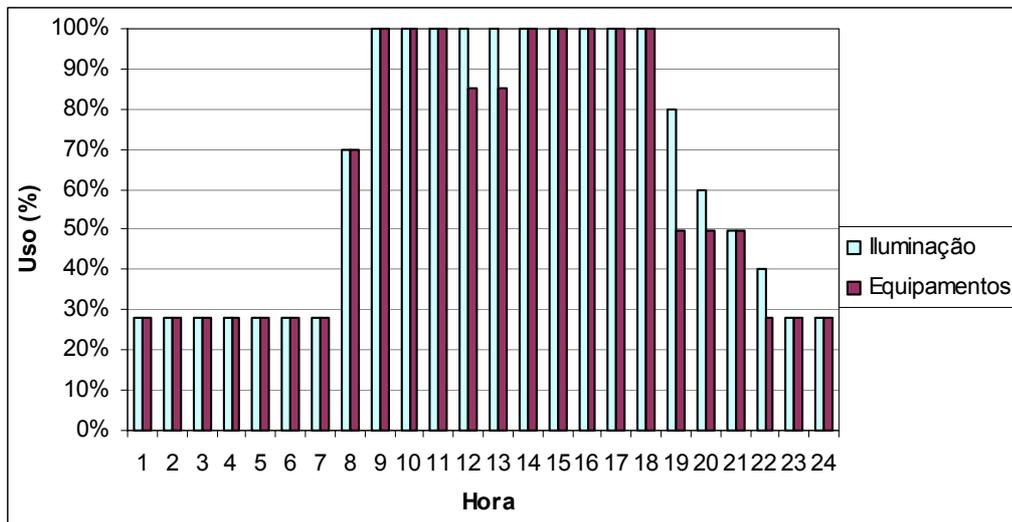


Figura 18 - Padrão de uso calibrado

A Figura 19 demonstra a análise diária da primeira etapa – modelo 1b, para o dia 29 de agosto.

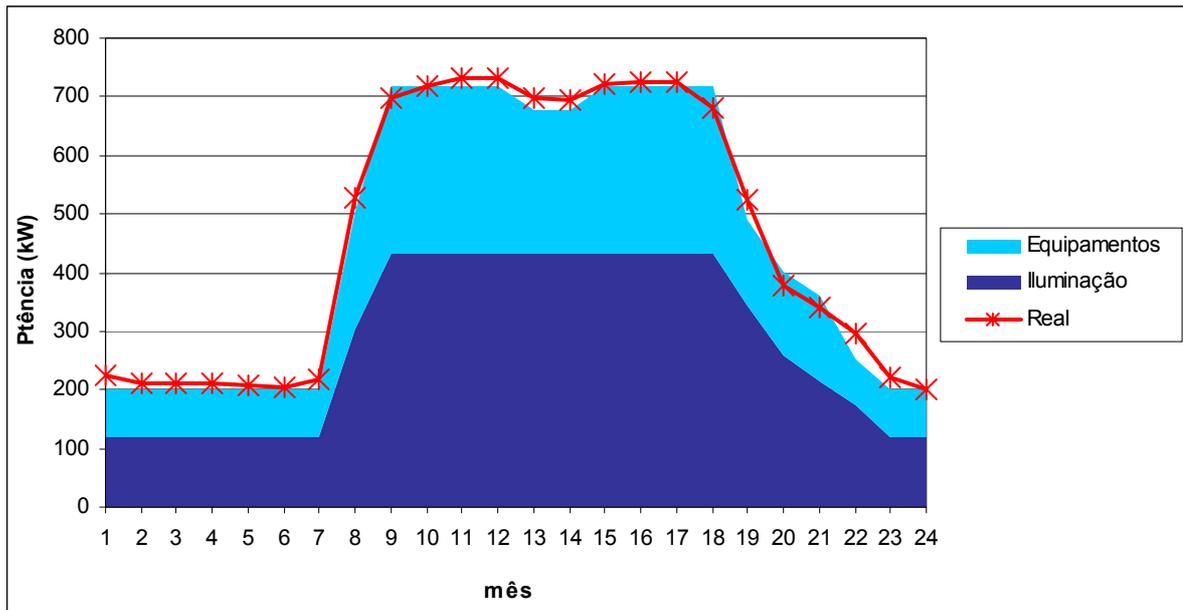


Figura 19 – Etapa 1b – Potência - 29/ago

Ao simular um aumento de demanda de energia elétrica, para o devido ajuste da curva, considerou-se que outros equipamentos estivessem ligados (180 kW), totalizando uma potência de 288 kW, o que permitiu a calibração do modelo para as cargas constantes em um dia com pouco ou nenhum acionamento do condicionamento de ar. Este complemento com outros equipamentos representam o consumo dos 66 ventiladores, o *chiller* alternativo e suas bombas (ligados 24h especialmente) e iluminação noturna.

Considerando a informação de potência de iluminação relatada no estudo realizado por Pedrini (1997), pode-se verificar a ordem de grandeza da potência restante a ser inserida no modelo para calibração das cargas constantes, visto que poucas reformas no sistema de iluminação ocorreram desde a época do trabalho.

Percebe-se que na primeira simulação (1a) considerou-se um padrão de uso simplificado, o qual foi detalhado na simulação posterior (1b), representando melhor o comportamento da edificação.

Com isso, pode-se apresentar o consumo anual de energia elétrica das cargas constantes, conforme o modelo 1b, através da Figura 20.

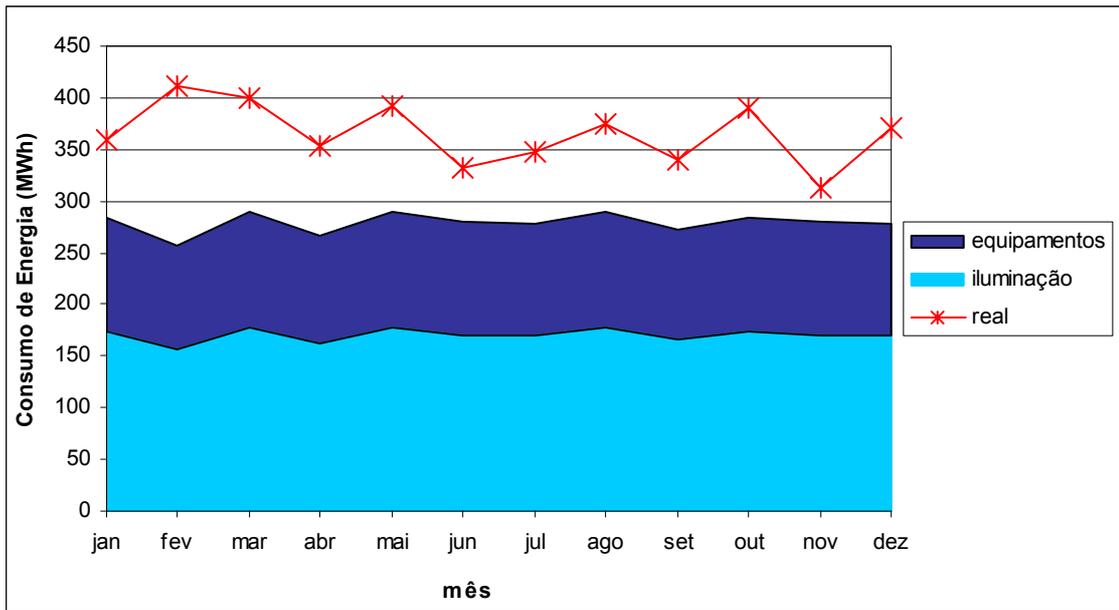


Figura 20 – Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 1b

Desta maneira, pode-se estimar o consumo de condicionamento de ar, sendo o mesmo, o restante que completa o consumo mensal.

A Figura 21 demonstra a distribuição do uso final de energia elétrica na edificação.

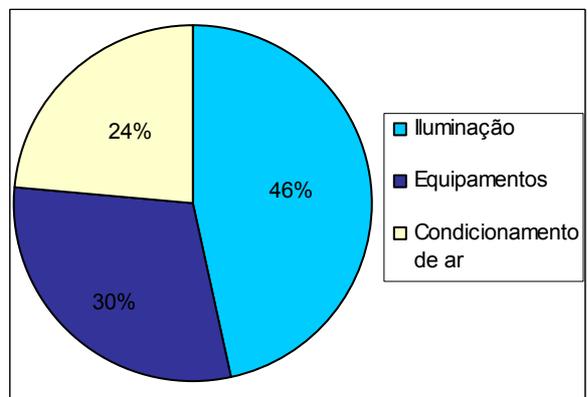


Figura 21 – Usos finais - Etapa 1b

4.4.2 Etapa 2 – Análise dos Fluxos de Calor

A caracterização da geometria das paredes e janelas foi definida de acordo com a escolha de uma hipótese de modelo simplificado adequado para o caso, e posteriormente pode-se gerar um código de modelo, contendo os parâmetros necessários para a simulação.

Para acelerar o processo de modelagem, a análise dos fluxos de calor é feita apenas para os dias de projeto. Para a região de Florianópolis, adotou-se 21 de janeiro no verão e 21 julho no inverno, com dados dos dias de projeto obtidos em Goulart et al. (1998).

As janelas das fachadas são representadas pelo WWR (Window-to-Wall Ratio), ou seja, o percentual de área de janela na área fachada, o qual para a Sede ELETROSUL foi estipulado aproximadamente 90%, conforme plantas e inspeção no local.

Com modelo geométrico pronto pode-se inserir outras variáveis específicas do prédio, como orientação, ocupação, proteção solar, infiltração e sistema de condicionamento de ar.

A orientação é facilmente alterada de 0° (padrão) para 118° , pois o programa disponibiliza a opção de coordenadas relativas, girando todo o prédio a partir do ponto de origem ($x=0$, $y=0$, $z=0$). A Figura 22 demonstra uma vista em 3 dimensões do modelo gerado pelo programa.

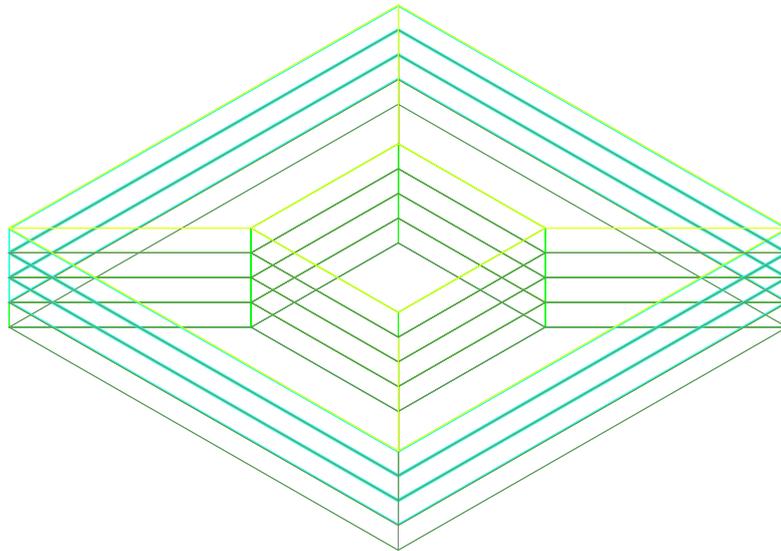


Figura 22 – Modelo em 3 dimensões

Nesta etapa adiciona-se a ocupação, definindo a quantidade de pessoas que trabalham no prédio, localizando-os nos seus devidos ambientes.

A ocupação do prédio contribui com uma parcela de calor adicionado na carga térmica, tornando importante caracterizar o metabolismo médio para os ocupantes e a quantidade de pessoas no prédio. Adotou-se uma taxa de metabolismo de 130W para uma pessoa em atividade de escritório, a qual é sugerida pela ASHRAE (2001), e um total de aproximadamente 300 pessoas por pavimento, distribuídos uniformemente nas zonas condicionadas, de acordo com informações obtidas na administração da Sede ELETROSUL.

O padrão de ocupação do prédio compreende o mesmo período adotado para representar o acionamento dos equipamentos, 28% acionado no fim de semana e a noite, 85% no horário de almoço (12 as 14h) e 100% para o resto do dia durante a semana.

O edifício em estudo é envolvido por proteções solares externas de alumínio, que impedem a entrada de radiação direta para o ambiente. O sistema é afastado das fachadas em 1 metro, e possui controle de inclinação manual. Pode-se perceber em inspeções no

prédio que as proteções permanecessem longos períodos na mesma posição, observando grandes diferenças de inclinações (variando de 0° - fechado até aproximadamente 45° - parcialmente abertos). Em geral, permitindo pouca ou nenhuma entrada de radiação direta.

O *Energyplus* possui um banco de dados de materiais utilizados em proteções solares, de onde pode-se solicitar com características semelhantes às encontradas no edifício em estudo, placas de alumínio de média refletividade, tanto para radiação difusa quanto para a direta (0,5).

A dimensão de 35cm foi adotada para as placas, com inclinação das aberturas definidas a 45° .

Nas laterais e na parte superior das proteções, existem placas fixadas com pequenos orifícios, as quais impedem a incidência de radiação solar direta, permitindo um pequeno fluxo de ar.

A Figura 23 demonstra um exemplo verificado no local, de proteção lateral vazada.



Figura 23 – Proteção lateral vazada

Nesta etapa da calibração, adiciona-se um sistema de condicionamento de ar fictício (purchased air).

Na configuração do equipamento de condicionamento de ar, optou-se pelo auto-dimensionamento da capacidade, onde o programa calcula a capacidade necessária do sistema, sob influência de todas as variáveis inseridas no modelo.

Os limites de capacidade podem também ser definidos pelo usuário, definindo as variáveis de taxa máxima de fluxo de ar para resfriamento e aquecimento, taxa de fluxo de ar externo, entre outros.

A maneira mais prática de utilizar o sistema “purchased air” é criar uma macro do *EnergyPlus* (EP-Macro), ou utilizar exemplos pré-definidos. Para este estudo, utilizou-se a macro (HVACTemplates.imf) fornecida pelo *EnergyPlus*, onde o usuário define apenas alguns parâmetros específicos e referencia ao código pré-definido.

Na modelagem desta segunda etapa, o período de funcionamento do sistema de condicionamento de ar foi definido das 8 às 18h, com temperatura de controle de 24°C para resfriamento. O aquecimento não foi incorporado no modelo em virtude do edifício dificilmente necessitar deste recurso, visto que possui alta carga interna, gerando calor, conforme entrevista com equipe de manutenção do edifício .

O sistema “purchased air” necessita que seja definida uma taxa de infiltração para cada zona condicionada. A infiltração caracteriza a entrada de ar por frestas de portas e janelas, ou algum tipo de abertura que possibilite um pequeno fluxo de ar.

A taxa de infiltração é um parâmetro difícil de ser medido ou adquirido. Com isso utilizaram-se dados extraídos do ASHRAE FUNDAMENTALS (2001), os quais referenciam taxas de infiltração por unidade de área de parede externa, à uma diferença de pressão de 75 Pa. Definiu-se então, o valor de $3000 \text{ cm}^3/(\text{s.m}^2)$, supondo paredes mais vazadas, o qual representa $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o caso em estudo, ou 0,6 ACH (*Air Changes per Hour*).

Através da análise dos fluxos de calor pode-se identificar qual dos componentes representa maior ganho de calor no modelo.

A Tabela 4 demonstra os parâmetros listados em ordem decrescente de fluxos de calor, onde o quadro a esquerda inclui todas as fontes, e a direita exclui Iluminação e Equipamentos (já calibrados).

Tabela 4 – Fontes de Calor

Todas as Fontes de Calor (kW)		Todas as Fontes de Calor (%)		Excluindo Iluminação e Equipamentos (%)	
Iluminação	6.693	Iluminação	30%	Janelas	38%
Janelas	4.271	Janelas	19%	Infiltração	24%
Equipamentos	4.243	Equipamentos	19%	Cobertura	16%
Infiltração	2.679	Infiltração	12%	Piso	10%
Cobertura	1.828	Cobertura	8%	Pessoas	9%
Piso	1.132	Piso	5%	Paredes	3%
Pessoas	960	Pessoas	4%	Iluminação	-
Paredes	303	Paredes	1%	Equipamentos	-

Verificando-se todos os fluxos de calor (Tabela 4 – coluna da esquerda), percebe-se que a iluminação, janelas e equipamentos representam mais de 69% dos fluxos, e que as paredes e o ocupantes 5%. Com isso pode-se estabelecer prioridades de análises, focando-se nas mais significativas.

Como a Iluminação e Equipamentos já foram anteriormente calibrados, pode-se elaborar uma nova lista de fluxos de calor (Tabela 4 – coluna da direita), excluindo estes parâmetros.

Percebe-se, na nova análise, que as janelas passaram a ser o item mais significativo (38%), o qual deverá receber maior atenção na próxima etapa (análise de sensibilidade), seguido pela infiltração de ar (24%).

4.4.3 Etapa 3 – Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é aplicada para se verificar o grau de influência que os dados de entrada (*input*) provocam no consumo de energia elétrica do condicionamento de ar do modelo (*output*).

Para aplicação deste procedimento, definem-se algumas modificações a partir do caso base (gerado na etapa 2), onde será possível identificar o impacto das mesmas.

Seis casos foram gerados devido às alterações feitas no modelo, conforme a Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Alternativas simuladas – *input* e *output*

Caso	<i>input</i>		<i>output</i> - Carga térmica [kWh] – 21/jan	
	Casobase	Alternativa	Casobase	Alternativa
3a - WWR (%)	90	70	11.753	11.442
3b - Espessura do vidro (mm)	3	6	11.753	11.808
3c - Ts+Abs	0,925	0,937	11.753	11.934
3d - Pé direito (m)	5	4	11.753	11.395
3e - Proteção solar (°)	45	35	11.753	11.618
3f - Orientação solar (°)	118	160	11.753	11.723

Conforme a Equação 1, pode-se calcular o coeficiente de influência (CI), o qual é demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficiente de Influência - Análise de sensibilidade

Caso	Δ <i>input</i>	Δ <i>output</i>	$CI = \left(\frac{\Delta_{out}}{\Delta_{in}} \right)$
3a - WWR	-22,2%	-2,6%	0,12
3b - Espessura	100,0%	0,5%	0,00
3c - Ts+Abs	1,3%	1,5%	1,19
3d - Pé direito	-20,0%	-3,0%	0,15
3e - Proteção solar	-22,2%	-1,1%	0,05
3f - Orientação solar	35,6%	-0,3%	-0,01

Desta maneira pode-se ordenar os parâmetros por grau de influência, permitindo focar as simulações posteriores nos mais importantes.

O coeficiente de influência pode ser listado da seguinte forma:

- 1) Transmissividade e Absortância (Ts+Abs) – 3c;
- 2) Pé-direito – 3d;
- 3) WWR – 3a;
- 4) Proteção solar – 3e;
- 5) Espessura – 3b;
- 6) Orientação solar – 3f.

No caso “3c”, a mudança de vidro transparente para verde resultou em um aumento no consumo de energia elétrica, apesar de possuir uma transmissividade mais baixa (mais escuro) que o vidro claro, o vidro verde absorve muito mais radiação solar. Com isso, supõe-se que o mesmo possa estar emitindo mais calor para o interior do ambiente, conseqüentemente contribuindo mais para carga térmica do ar interno. Percebeu-se que o parâmetro Ts+Abs é função da cor do vidro e da existência ou não de película reflexiva.

A altura entre lajes foi reduzida em 1 metro (-20%), a qual reduziu a área de parede e janela, demandando cerca de 3,0% a menos de energia térmica para manter o edifício em temperatura adequada.

Para o caso “3a”, diminuir a área de janela resultou na redução do consumo de energia, em virtude da quantidade de radiação direta transmitida para o ambiente ser menor.

Já para as proteções solares, houve uma redução no ângulo de abertura, fechando mais os mesmos, o que resultou numa pequena redução do consumo de energia.

As modificações feitas na espessura do vidro e no azimute do edifício não acarretaram variações significativas na carga térmica do modelo.

O aumento do consumo de condicionamento de ar quando alterou-se de vidro transparente para verde, foi um resultado inesperado. Em geral, a substituição de vidros que barram a incidência de radiação direta para o ambiente (por exemplo o verde) é recomendada em análise de alternativas de economia energia elétrica. Porém para o edifício em estudo, identificou-se o contrário. Com isso foram realizados alguns testes para investigar o comportamento deste componente.

A Tabela 7 demonstra a análise de quatro tipos de vidros de 3 mm, onde pode-se verificar a carga térmica, o somatório das propriedades do vidro (Transmissividade e Absortância) e as trocas de calor no vidro (diferença entre ganhos e perdas).

Tabela 7 – Análise de propriedades de vidros – dia de projeto (verão)

Tipo de vidro	Ts+Abs	Carga térmica [kWh]	Trocas calor [kWh]	FS
Grey 3mm	0,94	10.071	2.773	0,78
Green 3mm	0,94	10.063	2.772	0,79
Clear 3mm	0,93	9.885	2.686	0,88
Low Iron 3mm	0,92	9.809	2.596	0,91

Analisando as trocas de calor nos diferentes tipos de vidro, percebeu-se que o verde (*green*) troca mais calor com o ambiente que o claro (*clear*), conseqüentemente, contribuindo mais carga térmica na zona térmica, o que demanda mais energia elétrica.

A relação entre os vidros é diretamente proporcional quando se correlacionam os parâmetros (Ts+Abs), Carga térmica, Troca de calor (diferença entre ganhos e perdas). Já para o fator solar (FS) não existe correlação, provavelmente por terem sido calculados de uma forma aproximada, onde se somou a transmissão direta e a metade da parcela absorvida pelo vidro, conforme Lamberts et al. (1997). Por definição pode-se citar que a parcela absorvida deve ser representada apenas pela parte retransmitida para o interior.

A Figura 24 demonstra uma análise dos quatro tipos de vidros, através da correlação entre o parâmetro utilizado nesta etapa, a Transmissividade e Absortância (Ts+Abs) e a Carga térmica, para um dia típico de verão (21 de janeiro).

Observou-se que existe uma relação direta, para o caso estudado, entre Carga térmica e Ts+Abs, ou seja, ao aumentar esta propriedade do vidro (por exemplo mudando de vidro claro para verde) o consumo tende a aumentar e não diminuir, como esperava-se quando apenas a transmissão direta e metade da parcela absorvida eram considerados. Vidros de baixa emissividade (por exemplo *Low-e*) não foram considerados nesta análise.

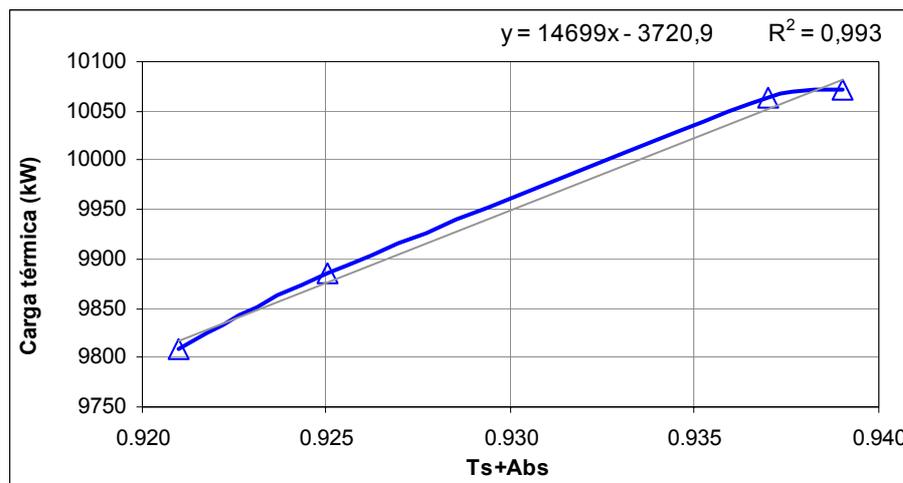


Figura 24 – Correlação entre Transmissividade+Absortância e Carga térmica

Analisou-se também a correlação entre trocas de calor na janela e carga térmica, o qual apresentou uma R^2 de 0,956.

Decidiu-se analisar os fluxos de calor entre o vidro claro e o verde, com propósito de identificar a parcela de calor absorvida e transmitida para os ambientes. Escolheu-se uma janela específica para esta análise, denominada Janela 4 do segundo pavimento (fachada Noroeste), conforme apresenta a Figura 25.

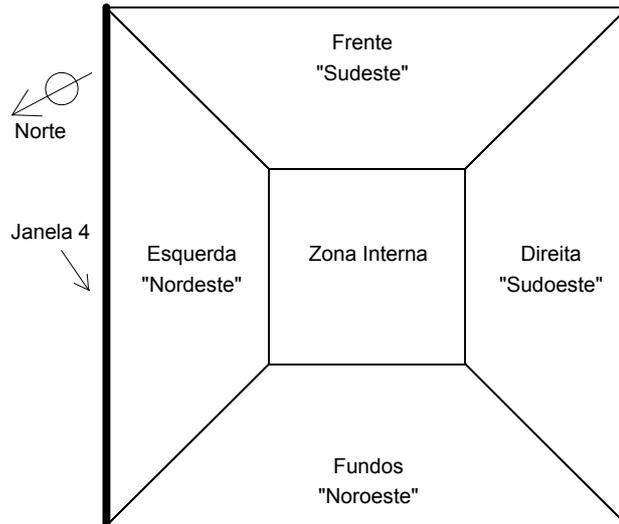


Figura 25 – Croqui - Janela 4 do pavimento 2 – Análise dos vidros

Pode-se perceber através da Figura 26 o perfil do fluxo de calor ao longo do dia típico de verão na janela 4 do segundo pavimento.

Observa-se que o calor absorvido (Abs) pelo vidro verde é muito maior que o absorvido pelo claro. Já para a transmissividade (Ts), o claro transmite mais calor para o ambiente do que o verde, havendo uma compensação entre os vidros. Porém ao somar as duas propriedades (Ts+Abs) percebe-se que o maior valor é proveniente do vidro verde.

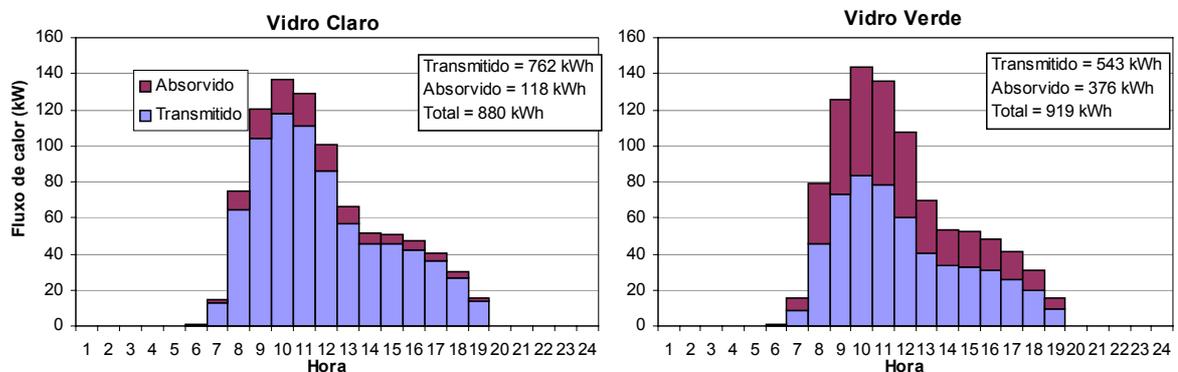


Figura 26 – Comparação entre o calor absorvido e transmitido pelos dois tipos de vidro analisados

O calor absorvido por um vidro é transmitido tanto para o interior (superfície interna), como para o exterior (superfície externa). Com isso ao analisar o fluxo de calor interno (diferença entre temperatura superficial interna e temperatura da zona multiplicada pelo coeficiente de convecção interno) pode-se identificar a quantidade de calor da parcela absorvida que é adicionada para o ambiente através da convecção com ar. A Figura 27 apresenta o fluxo interno para a janela 4 do segundo pavimento.

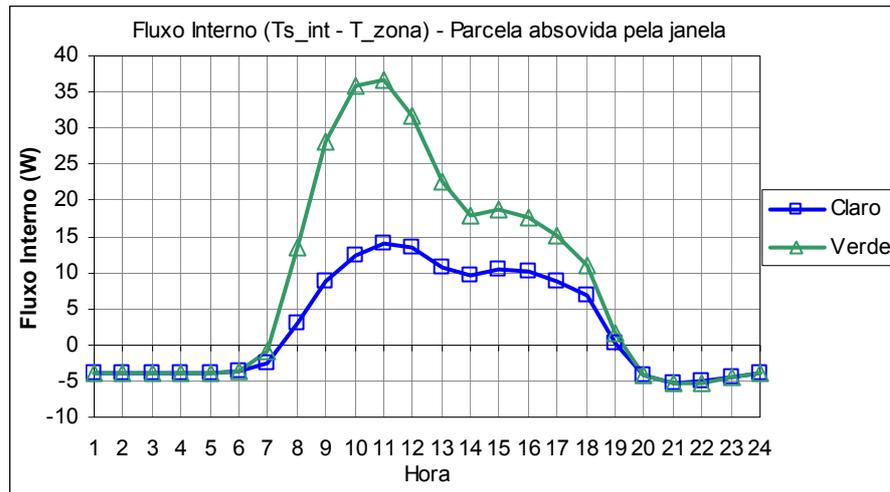


Figura 27 – Fluxo interno – Parcela absorvida

Pode-se perceber que a quantidade de calor absorvido que o vidro verde transmite na forma de convecção para o ar do ambiente é maior do que para o vidro claro.

A Figura 28 demonstra o perfil de temperatura da superfície interna da janela para os modelos utilizando vidro verde e claro, bem como a temperatura do ambiente (24°C). O motivo pelo qual a modelagem com vidro verde consumiu mais energia elétrica para manter o ambiente na temperatura de conforto que um vidro claro é justamente a diferença entre as temperaturas superficiais internas, aumentando o fluxo de calor para o ambiente, conseqüentemente aumentando a temperatura do ar, o qual demanda mais energia elétrica para retirar uma quantia maior de calor.

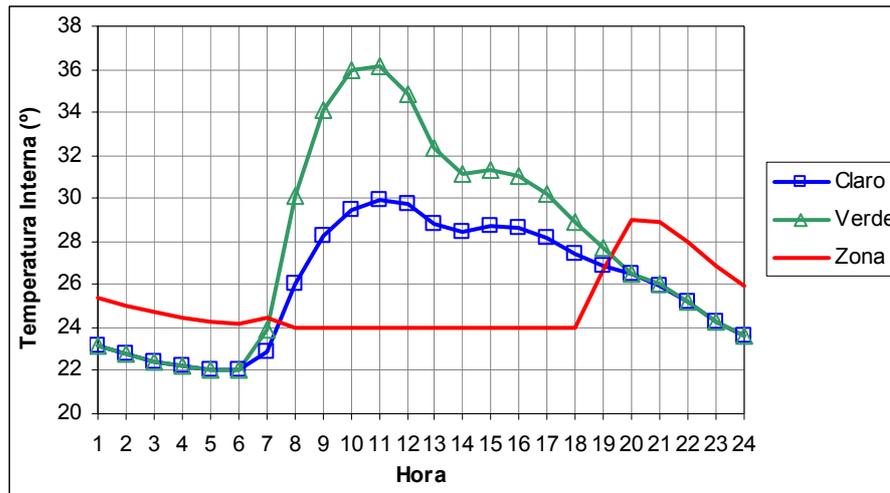


Figura 28 – Temperatura da zona e superficial interna

No final desta etapa pode-se identificar que as variáveis de entrada (T_s+Abs , pé-direito e WWR) geram as maiores diferenças no consumo de condicionamento de ar (variáveis de saída), quando alteradas. Estas variáveis deverão receber maior atenção, o que para o caso da Sede da ELETROSUL, requisitou uma inspeção em campo para o devido detalhamento.

4.4.4 Etapa 4 – Ajustes Sobre o Modelo

Conforme a etapa anterior, os componentes de maiores coeficientes de influência foram ajustados, conforme inspeção no edifício.

Na inspeção das janelas, percebeu-se que em algumas fachadas haviam sido colocadas películas reflexivas nos vidros. Utilizou-se o banco de dados de composições de vidros do *EnergyPlus*, no qual optou-se por um vidro de média refletividade, resultando numa redução do somatório das propriedades transmissividade e absorvância (variáveis de entrada analisadas) de 0,925 para 0,800.

Na verificação detalhada do pé-direito do prédio através de plantas (vistas e cortes) e inspeção *in-loco*, observaram-se que os pavimentos, inicialmente definidos com 5 m, possuem 5,7 m de altura, exceto para o térreo, o qual foi definido 6,1 m. O valor acumulado considerando o ajuste em todos os andares passou de 20 m para 23,2 m.

O WWR foi verificado tanto no próprio edifício como em plantas e cortes, o qual constatou-se 82% de área de janela por fachada.

Já nas proteções solares, o ângulo de abertura foi reduzido de 45° para 20°, devido a grande quantidade encontrar-se apenas parcialmente abertos, permitindo pouca passagem de iluminação natural e radiação solar.

A informação relacionada à espessura do vidro foi adquirida e alterada para 6mm, embora provoque pouca influência para o caso em estudo.

Os ajustes feitos no modelo, condizem mais com a realidade do edifício nesta etapa do que na anterior, não havendo necessidade de executar a simulação.

4.4.5 Etapa 5 – Simulação de um Ano Completo

Nesta etapa o modelo é simulado para um ano completo, adotando todas as alterações prévias e adicionando o sistema de condicionamento de ar real da edificação, no caso em estudo, uma central de água gelada.

A central de água gelada é composta por duas centrífugas de 420TR e um *chiller* alternativo (ligado 24h) de 100TR. Nesta etapa o padrão de uso utilizado para o sistema de condicionamento de ar inserido no modelo foi totalmente acionado das 8 às 18h.

As centrífugas possuem dois conjuntos de bombas, sendo o primeiro composto por 2 bombas para água de condensação (2 x 50HP) e o segundo por 2 bombas para água gelada (2 x 60HP). Já o *chiller*, que fica ligado o ano todo no período da noite e fim de semana, possui 2 bombas, sendo uma para água de condensação (10 HP) e a outra para água gelada (12 HP).

O sistema possui também 4 torres de resfriamento com motores de 10 HP cada, que funcionam na medida que o sistema solicita, em função da carga na centrífuga e temperatura do ar externo.

Com estes parâmetros pode-se iniciar a caracterização no modelo, e posteriormente a simulação. Depois de processada a simulação, pode-se comparar o consumo total do edifício Sede da ELETROSUL com o do modelo. A Figura 29 demonstra o consumo real e simulado (iluminação + equipamentos + condicionamento de ar). O consumo simulado anual foi 8% maior que o real, com variações mensais de até 26%, o que indica através da metodologia aplicada que se deve ajustar alguns parâmetros.

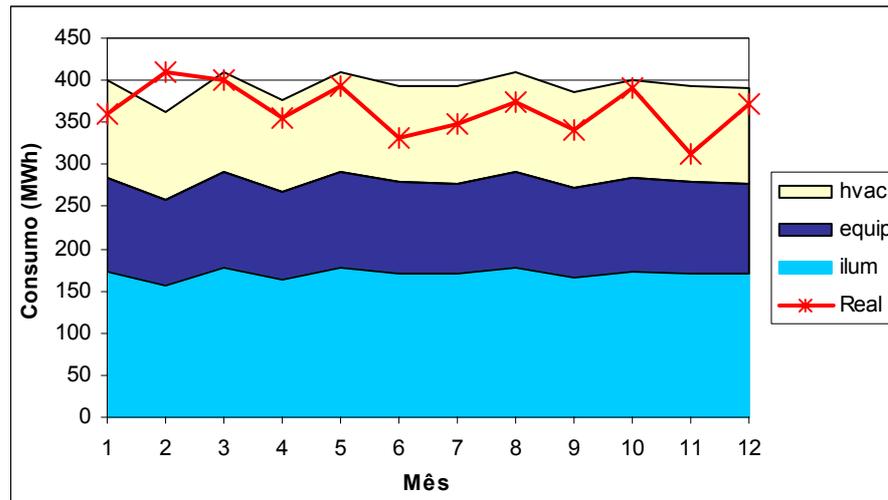


Figura 29 – Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 5

Os usos finais para esta simulação são demonstrados através da Figura 30.

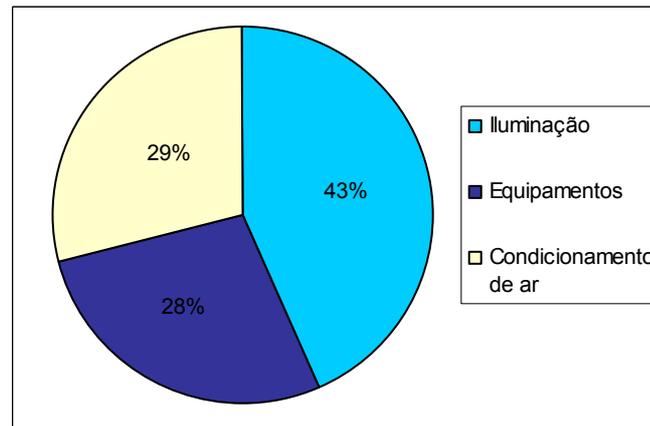


Figura 30 – Usos finais – Etapa 5

4.4.6 Etapa 6 – Ajustes Finais

Nesta etapa a potência dos outros equipamentos (180 kW) adicionados no modelo para calibração das cargas constantes devem ser retirados para não sobreporem os consumos calculados pelo programa. Considerou-se que os 66 ventiladores e o chiller e bombas alternativas (ligado 24h especialmente para 2 salas de controle) encontravam-se inclusos nestas definições.

O padrão de uso do sistema de condicionamento de ar também foi alterado, conforme entrevista realizada com o operador do sistema.

As bombas funcionam junto com as centrífugas e com o *chiller* (cada conjunto com o seu resfriador correspondente). A centrífuga funciona em horário comercial: das 6h às 18h (cerca de 12h/dia) no verão e das 10h às 18h (às vezes desligam antes, funcionando

apenas 6h/dia) no inverno. Já o *chiller* só funciona fora do horário comercial (noite e fim de semana), quando a centrífuga é desligada.

Ajustou-se o período de acionamento do sistema de condicionamento de ar e o consumo simulado anual foi 6% menor que o real, com variações mensais de até 23%, o que indica, de acordo com a metodologia aplicada, que se deve retornar a etapa 3 (análise de sensibilidade), re-analisando o modelo como um todo a cada etapa.

O consumo simulado para um dia de verão pode ser observado através da Figura 31. O modelo aproximou-se bem para um dia qualquer de verão, embora apresente uma defasagem, provavelmente oriunda do horário de verão.

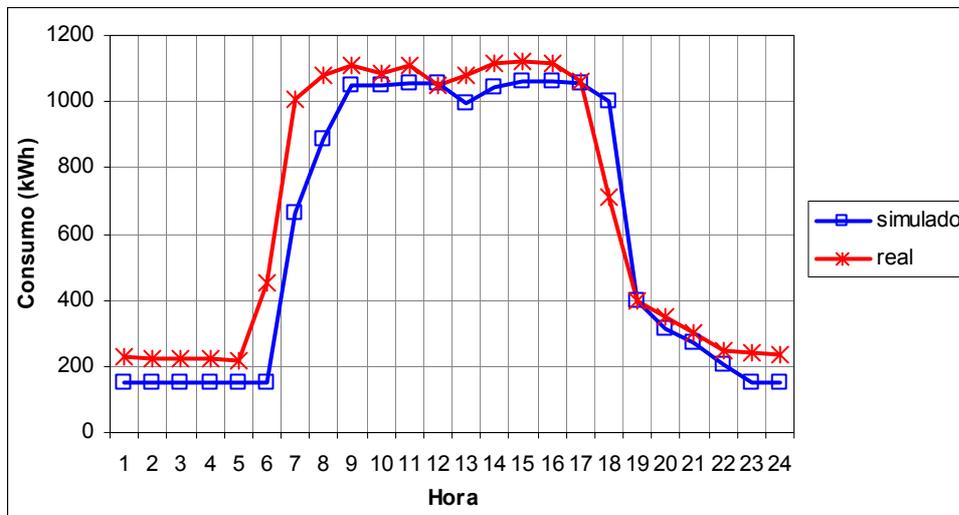


Figura 31 – Consumo dia 4 janeiro (simulado x real)

Percebe-se através da Figura 32 que o perfil de consumo ao longo do ano não foi bem representado, pois o mesmo encontra-se praticamente constante (próximo a 350 MWh) para a maioria dos meses. Não há uma variação significativa entre o verão e inverno, que dificilmente poderá ser estimada através de simulação computacional, já que o acionamento do sistema de condicionamento de ar é todo manual e imprevisível.

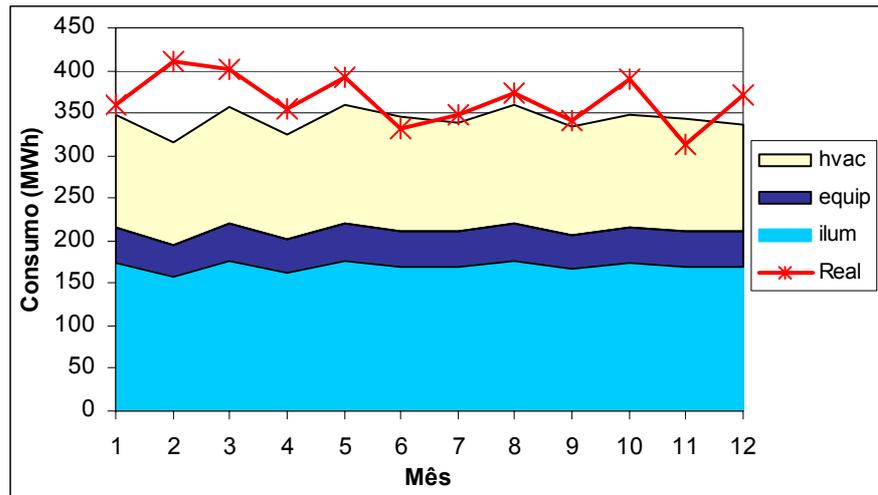


Figura 32 - Consumo mensal (simulado x real) – Etapa 6

Percebe-se o consumo de energia é grande parte oriundo do sistema de iluminação e condicionamento de ar, como pode-se verificar através da Figura 33.

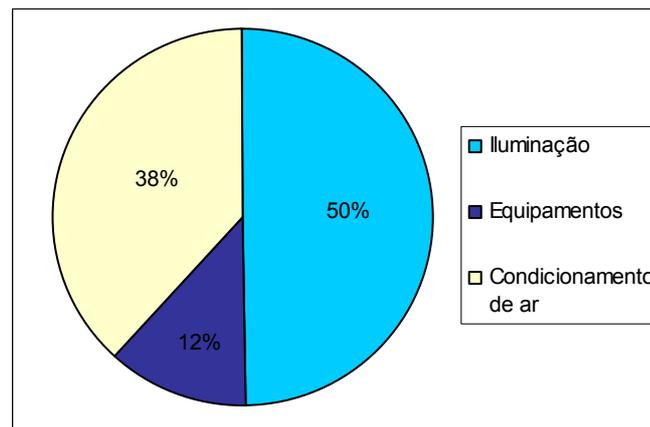


Figura 33 – Usos finais – Etapa 6

A análise de sensibilidade pode ser aplicada também em outras variáveis de menor influência no comportamento térmico. Com isso, o modelo poderia ser refinado progressivamente, das variáveis mais significativas para as de menor importância.

Cabe ressaltar que quanto maior o nível de detalhamento de um caso mais fidedignos são o modelo e os resultados, porém, maiores são os custos e o tempo demandado. Com isso, pode-se afirmar que a carga constante foi representada detalhadamente através da calibração das primeiras etapas. Já o modelo completo pode ser ainda mais refinado, empregando tanto a análise de fluxo de calor em outras variáveis, como também a análise de sensibilidade no sistema de condicionamento de ar. Percebe-se a necessidade de um estudo detalhado no condicionamento de ar na metodologia aplicada.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho aplicou-se uma metodologia de calibração a partir da análise de sensibilidade sobre um modelo simplificado de um edifício de escritórios.

A complexidade da entrada de dados para simulação energética de um edifício em um programa como o *EnergyPlus* é um fator que exige tempo e atenção do usuário. Foram propostos três modelos simplificados para simulações preliminares.

A análise através da metodologia de calibração utilizada permitiu uma investigação detalhada do desempenho térmico do prédio da ELETROSUL, em uma modelagem de curto prazo.

Na calibração das cargas constantes identificou-se que 76% do consumo total da edificação é oriundo de equipamentos e iluminação. Já na segunda etapa, criou-se o caso base, iniciando a análise de fluxos de calor, verificando que as janelas compõem 19% do fluxo total, representando o parâmetro de maior influência não calibrado até esta etapa.

Na terceira etapa, através da análise de sensibilidade, verificou-se que os parâmetros Transmissividade e Absortância do vidro, pé-direito, WWR (área de janela por fachada) representaram, respectivamente, os maiores impactos no consumo de condicionamento de ar. Estas variáveis receberam maior atenção na quarta etapa, onde foram buscadas informações para melhor caracterização dos parâmetros, conforme inspeção no edifício, medições, entrevistas com operador do sistema de condicionamento de ar, entre outras fontes (plantas, relatórios, publicações).

Analisando-se as trocas de calor em vidros, percebeu-se que a alteração do tipo de vidro (de claro para verde) para um modelo com as características do prédio da ELETROSUL em um dia típico de verão, aumenta o consumo de energia elétrica do condicionamento de ar. Através de um estudo detalhado constatou-se que o vidro verde acrescenta maior quantidade de calor no ar interno dos ambientes simulados. O vidro verde absorve mais calor que o claro, tornando sua temperatura superficial interna mais alta do que no vidro claro. Desse modo a quantidade total de calor adicionada na carga térmica do ambiente foi maior para o vidro verde, visto que a temperatura interna do ambiente é a mesma para os dois tipos de vidro.

Com um modelo mais completo iniciou-se a simulação para o período de um ano, onde se estimou o consumo de energia elétrica do modelo simulado, possibilitando a comparação com o real, a qual resultou em uma variação no consumo anual e mensal de 8% e 26% a mais, respectivamente.

Verificando este consumo superestimado, ajustou-se o modelo na última etapa, na qual o padrão de uso foi regulado, conforme entrevista realizada com equipe de manutenção

do edifício. A potência instalada referente a outros equipamentos (66 ventiladores, bombas e *chiller* da sala de controle), adicionadas na etapa da calibração das cargas constantes, foi retirada para que não ocorressem sobreposições no consumo de energia elétrica. Nesta análise, o consumo simulado anual foi 6% menor que o real, com variações mensais de até 23%.

Não há uma variação significativa entre o consumo simulado no verão e inverno, que dificilmente poderá ser estimada através de simulação computacional, já que o acionamento do sistema de condicionamento de ar e da abertura das proteções solares é todo manual e imprevisível, dificultando a representação em um modelo computacional.

A análise de sensibilidade pode ser aplicada em outras fontes de calor ou variáveis, tais como infiltração, cobertura, ocupação, piso, paredes, entre outras, melhorando a representação do comportamento térmico do modelo no programa.

A partir disso, com o modelo completamente calibrado pode-se iniciar a análise de alternativas de *retrofit*, a qual tem por objetivo principal a aplicação de soluções para redução de custos associados ao consumo de energia.

No caso do edifício em estudo, poderiam ser propostos estudos de melhoria no sistema de iluminação, controle de proteção solar automatizado, troca da central de água gelada, entre outros.

Com base nos resultados e dificuldades encontradas neste trabalho, sugere-se como recomendações para trabalhos futuros:

- a) Análise de fluxos de calor e da influência da temperatura do solo em paredes de subsolo;
- b) Avaliar as características térmicas da cobertura, definindo corretamente tanto a transmitância e isolamento térmico, como os domos de acrílico no vão central, caso tenham contribuição significativa na carga térmica;
- c) Correlacionar a carga térmica e parâmetros de entrada provenientes de modelos utilizando vidros de baixa emissividade;
- d) Análise de sensibilidade para o condicionamento de ar.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. 2001. ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: **Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 2001.
- CRAWLEY, D. B.; LAWRIE L. K.; PEDERSEN, C. O.; WINKELMANN, F. C. 2000. **“EnergyPlus: Energy Simulation Program”** in ASHRAE Journal, Vol. 42, No. 4 (April), pp. 49-56.
- CORSON, G. C. (1992). **Input-Output Sensitivity of Building Energy Simulations**. ASHRAE Transactions: Symposia., v.92(1), p.618-626.
- DOE 2005, U.S. **Department of Energy**. <www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory>. Acesso em: 7 jun 2005.
- ELLIS, M. W.; MATHEWS, E. H. **A new simplified thermal design tool for architects**. **Building and Environment**. 2001, v. 36, p. 1009-1021.
- EnergyPlus 2005, versão 1.2.1.030: **U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office**. <<http://www.energyplus.gov>>. Acesso em: 10 jun 2005.
- ENERGYPLUS 2005, **Input/Output Reference**. <www.energyplus.gov>. Acesso em: 20 jun 2005.
- GÓMEZ, L.A.; LAMBERTS, R. (1995) **Simulação da Influência de Algumas Variáveis Arquitetônicas no Consumo de Energia em Edifícios**. III ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 95.
- GOSCH, S. R.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Análise energética de edificações através da simulação de células**. 10th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING - ENCIT 2004.
- GOULART, S. V.G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. (1998). **Dados Climáticos para Projetos e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**. Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC.
- HABERL, J. S.; BRONSON, J. D.; HINCHEY, S. B.; O’NEAL, D. L. (1993). **Graphical Tools to Help Calibrate The DOE-2 Simulation Program**. ASHRAE Journal, January: p.27-32.
- IEA 1995. **Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method**. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, February 1995.
- LABEEE (2004), WESTPHAL, F. S. ; GUGEL, E. C. ; BET, D. E.; TOCCOLINI, G.;LAMBERTS, R. **Avaliação de propostas de retrofit para o edifício sede da Eletrosul**. Florianópolis: LabEEE. 2004. Relatório interno.
- LABEEE (2005), **E2-ArCondicionado**, <<http://www.labeee.ufsc.br/edois>> Acesso em: 27 jun 2005.
- LAM, J.C.; HUI, S.C.M. **Sensitivity analysis of energy perfomance of Office buildings**. **Building and Environment**, v.31, n.1, p. 27-39, 1995.

LAMBERTS R. **Eficiência energética: estudo de retrofit para um edifício comercial em Florianópolis**. IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 97.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Editora PW - São Paulo, 1997 - 192 p.

LAMBERTS, R.; THOMÉ, M. R. V.; LOMARDO, L.; MASCARENHAS, A. C., 1998, **“Retrofit Demonstration in Brazilian Commercial and Public Buildings”**. In: 1998 ACEEE Summer Study On Energy Efficiency In Buildings.

LEE A.; WESTPHAL F. S.; LAMBERTS, R. (2001). **Verificação da eficiência energética de um edifício de escritórios através de simulação computacional: estudo de caso no departamento de engenharia civil da UFSC**. VII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 2001.

LEE A.; WESTPHAL F. S.; LAMBERTS, R. (2002) **Calibração de um modelo de simulação através de medições de curto prazo: estudo de caso no departamento de engenharia civil da UFSC**. VIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 2002.

MENDES, N. (1999) **Simulação Computacional do Edifício Sede da Telepar, Análise Energética e Proposta de Retrofit**. V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 99.

MME (2003). **Balço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Governo Federal. Brasília, DF.

NEUMANN, V.; SCHNEIDER, P. S. (1999) **Metodologias Simplificadas de Avaliação do Desempenho Energético de Edificações**. V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 99.

PEDRINI, A. (1997). **Desenvolvimento de metodologia para calibração do programa DOE-2.1E**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

GRASSO R., Pilar A. **Avaliação energética de um edifício comercial da cidade de Florianópolis**. [1997]. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

TOLEDO, L. (1997). **Uso Final de Energia Elétrica em Edifícios de Escritórios de Florianópolis**. IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 97.

WESTPHAL, F. S. (2000). **Proposta de melhoria na eficiência energética de um edifício comercial**, VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 2000.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Estudo de Melhoria na Eficiência Energética de um Edifício Comercial: Auditoria, Simulação Energética e Análise Econômica**. [1999]. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis**. In: BUILDING SIMULATION, 9, 2005, Montreal, Proceedings... IBPSA. Artigo Aceito.