

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DO CIRCUITO SECUNDÁRIO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DISTRITAL

Lucas Paglioni Pataro Faria, lppf@ig.com.br¹
Elizabeth Marques Duarte Pereira, bethduarte00@gmail.com²
Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br¹
Bruno Marciano Lopes, bruno.marciano@cemig.com.br³
Alexandre Salomão Andrade, alexandresalomao@ig.com.br⁴
Ivan Magela Corgozinho, ivanmagela@yahoo.com.br⁴
José Marcos Chaves Barbosa, zemarcoscb@yahoo.com.br⁴

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Avenida Antônio Carlos, Nº. 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Centro Universitário UNA, Avenida Raja Gabáglia, Nº. 3.950, Estoril, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Avenida Barbacena, Nº. 1200, Santo Agostinho, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Avenida Dom José Gaspar, Nº. 500, Prédio 50, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: Os sistemas de aquecimento distritais (DHS) são amplamente utilizados em países ao norte da Europa, como é o caso da Islândia, onde cerca de 90% das moradias são atendidas por uma rede composta por 29 sistemas distritais e cuja energia é de origem geotérmica. Já em países como a Dinamarca, a penetração dos sistemas distritais atinge 50% da população, compreendendo uma linha de distribuição de dutos de aproximadamente 20.000 km. Na Alemanha a penetração dos DHS atinge 12%, sendo 46% da energia destinada ao setor residencial, 36% ao setor comercial e 18% ao setor industrial. Entretanto, em países em desenvolvimento esta tecnologia é ainda inovadora, notadamente para atender a demanda de água quente em habitações de interesse social. O escopo desse trabalho é motivado pelo aumento significativo do número de aquecedores solares instalados pelo poder público nos últimos anos em conjuntos habitacionais de população de baixa renda no Brasil e pelos desafios técnicos inerentes à implantação destes sistemas a partir do desenvolvimento de novos modelos de sustentabilidade da tecnologia. Esses modelos visam minimizar a venda de equipamentos pós-ocupação pelos moradores e garantir melhores condições de operação / manutenção dos sistemas ao longo de sua vida útil. Inicialmente, foi feito um levantamento de tipologias típicas de conjuntos habitacionais adotadas no Estado de Minas Gerais / Brasil para residências com área construída da ordem de 40m², 4 moradores e renda familiar de 3 salários mínimos (R\$ 1395,00). Para o estabelecimento dos critérios mínimos a serem adotados na seleção do modelo de otimização, como por exemplo, minimização da recirculação requerida, do consumo de energia no bombeamento, do diâmetro das tubulações no circuito secundário e das perdas térmicas na rede de distribuição está em fase de desenvolvimento rotinas computacionais que permitirão a geração de uma matriz de resultados com a consolidação dos ganhos e a identificação das vantagens e desvantagens de cada configuração encontrada. A versão final, já concluída e desenvolvida nos softwares EES (Engineering Equation Solver) e Borland C++ Builder®, é fundamentada nas equações de energia, momentum e conservação de massa e tem por objetivos: 1) Dimensionar de forma otimizada os diâmetros das tubulações de alimentação e retorno (sub ramais, ramais e prumadas de alimentação) garantindo desta forma o menor custo possível de instalação; 2) Determinar as perdas de carga em cada trecho da rede prevendo a necessidade instalação de bombas hidráulicas de recirculação; 3) Implementação das equações de transferência de calor determinando-se assim as perdas térmicas inerentes às tubulações e conexões. A interface do programa com apresenta uma plataforma amigável e interativa de forma a permitir ao usuário resultados rápidos confiáveis.

Palavras-chave: Energia, Solar, Aquecimento, Distrital e Otimização.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de aquecimento urbano pode ser definido como um sistema que gera e distribui energia térmica, com água como fluido de transporte, que fornece água e aquecimento para os setores residencial e comercial. Atualmente, o DHS é muito utilizado nos países do Norte da Europa, como a Islândia, Dinamarca e Alemanha, onde a sua penetração é de 90%, 50% e 12%, respectivamente, para aquecimento de água (Samorka, 2008). A estes países, essa geração de energia tem aplicações residenciais, comerciais e industriais, com a produção proveniente de energia geotérmica, solar e outras fontes de energia. No entanto, o uso desta tecnologia em países, em desenvolvimento, ainda é inovadora, já que, sua energia é basicamente gerada por fontes como centrais hidráulicas e térmicas, a carvão e petróleo. No Brasil, a energia solar térmica é usada para aquecimento de água nos setores residencial, de serviços e industriais. Com uma área de cerca de 4.200.000m² de coletores solares (Iea, 2008), o Brasil é um dos 10 países com maior área de coletor solar instalado no mundo e, através de políticas e programas públicos, tem promovido a instalação de sistemas de aquecimento solar em comunidades de baixa renda. Esta tendência pode ser confirmada através da instalação de aquecimento solar em casas de mais de 15.000 famílias de baixa renda no país. Estes programas visam, principalmente, reduzir o consumo de energia da família e a demanda de energia em períodos de pico - o uso de aquecimento elétrico em 78% (Procel/Eletróbrás, 2005) dos domicílios brasileiros, onde 99,7% (Procel/Eletróbrás, 2005) são representados por chuveiros elétricos, gera uma demanda maior de energia em períodos da manhã e da tarde.

A instalação do DHS em comunidades de baixa renda tem a intenção de melhorar o funcionamento do sistema e as condições de manutenção garantindo a qualidade do abastecimento de água. O trabalho descrito neste artigo consiste em parte da pesquisa realizada para a implementação de um DHS em uma comunidade do estado de Minas Gerais, através de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento assinado entre Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), através do laboratório do Grupo de Estudos de Energia (GREEN), e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Basicamente um DHS será instalado em uma comunidade de no máximo 60 casas em Minas Gerais. Quatro equipes de pesquisa estão trabalhando neste projeto e são responsáveis por estudos relacionados com a inserção do sistema, projeto, execução, operação e controle. Neste artigo, será apresentado o desenvolvimento de um programa computacional criado para modelar e otimizar o sistema secundário de distribuição de água quente.

2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Um sistema de aquecimento distrital típico consiste em 4 componentes principais: a geração de água quente (circuito primário), que pode ser alcançada através de processos de co-geração, energia geotérmica, biomassa e energia solar, o armazenamento de água, que se caracteriza, na maioria dos casos de reservatórios sazonais e é implementado através de diferentes técnicas construtivas e com volumes em torno de 10.000 m³; e finalmente a distribuição de água, que é caracterizada por redes de tubulação de água quente e de consumo final pelo usuário.

A proposta de criar um programa computacional tem como objetivo modelar toda a dinâmica de fluidos do circuito secundário de um DHS incluindo as perdas térmicas provenientes da rede de tubulações. O sistema secundário é conhecido como sendo todas as tubulações e acessórios utilizados após a saída de água quente do reservatório térmico, em caso de um sistema que opere através de energia solar, no entanto, pode-se estender a análise a qualquer tipo de aquecimento central de água.

2.1. Modelagem Matemática

O primeiro objetivo do programa desenvolvido é a concepção de um arranjo não-otimizado, que avalia, através do critério do consumo máximo possível, os diâmetros, pressões e vazões de toda a rede de tubulações para distribuição de água quente do circuito secundário do DHS. Os métodos recomendados de construção e análise são os mesmos aplicados à rede de distribuição de água fria (Macintyre, 1997).

A fim de evitar o fornecimento de água ao consumidor a uma temperatura inadequada, é necessário verificar se a água quente circula eficazmente ao longo da rede de tubulações. Para realizar esta avaliação, considera-se que um circuito fechado é um “anel”, que contém os ramais ascendentes (tubulações que fornecem água quente aos consumidores) e descendentes (tubulações que retornam ao circuito primário com a água fria). Admite-se que a água circula em todos os ramais, quando os chuveiros não estiverem ligados. Para que o fluxo de circulação da água quente possa acontecer, é necessário que exista uma diferença suficiente de temperatura entre os ramais ascendentes e descendentes, caso isto não ocorra, deve-se fornecer energia suficiente para a água através de uma bomba hidráulica, bomba esta usada para vencer as perdas de carga ao longo das tubulações. A vazão que circula dentro das tubulações que saem do reservatório de água quente, será chamada de Q , e algumas variáveis devem ser definidas.

t_1 :	Temperatura da água no reservatório de água quente (K);
t_2 :	Temperatura da água dentro dos ramais ascendentes (K);
t_0 :	Temperatura ambiente (K);
S :	Superfície dos ramais das tubulações ascendentes (m);
K :	Coefficiente de transferência de calor através do isolante térmico das tubulações (W/m K);
S' :	Superfície dos ramais das tubulações descendentes (m);
Q :	Vazão de água nas tubulações que saem do reservatório de água quente (m ³ /s).

Para os ramos ascendentes pode-se considerar que as perdas de calor, considerando unidades de tempo, são aquelas inerentes à água que circula nas tubulações, o que pode ser representado pela Eq. (1).

$$K \cdot S \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_0 \right) = Q \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

onde o valor da vazão pode ser definido pela Eq. (2):

$$Q = \frac{K \cdot S}{2} \cdot \left(\frac{t_1 + t_2 - t_0}{t_1 - t_2} \right) \quad (2)$$

A fim de se garantir a ocorrência de fluxo nas tubulações ascendentes, a existência de uma certa "carga hidráulica" ou "potencial hidráulico", H_d , é importante.

Este potencial hidráulico é gerado pela diferença de densidades entre a água quente e fria respectivamente, nos ramos ascendentes e descendentes. A maior diferença de nível entre os ramos ascendentes e o centro do reservatório térmico é chamada de h . A carga H_d , que representa as perdas de carga em toda a rede de tubulações, é dada pela Eq. (3):

$$H_d = h \cdot (d_a - d'_a) \quad (3)$$

onde:

- d'_a : Massa específica da água dentro do reservatório térmico (kg/m^3);
- d_a : Massa específica da água nos ramos ascendentes (kg/m^3);
- h : Maior diferença de nível entre os ramos ascendentes e o centro do reservatório térmico (m);
- H_d : Potencial hidráulico (m).

Se o valor de H_d for insuficiente para equilibrar Q , com um valor de velocidade de cerca de 1,5 (m/s), pode ser necessário intercalar uma bomba centrífuga em um dos ramos ascendentes.

A altura manométrica da bomba somada à carga deve ser igual ao valor total de perda de carga, para o fluxo Q e velocidade V (Macintyre, 1997).

Outro objetivo do programa é a otimização dos diâmetros dos segmentos em relação à vazão (Consumo Máximo Provável), a fim de reduzi-los após se definir o perfil de cada consumidor, obedecendo as normas técnicas.

Para a estimativa das vazões, que são consideradas para o dimensionamento da rede hidráulica, utiliza-se a Eq. (4):

$$Q = C \cdot \sqrt{\sum P} \quad (4)$$

onde:

- Q : Vazão volumétrica (m^3/s);
- C : Coeficiente de vazão (m^3/s);
- $\sum P$: Soma do peso correspondente de todos equipamentos que podem ser utilizados simultaneamente e são ligadas à rede de tubulações (*adimensional*).

Em um sistema público de abastecimento de água, a quantidade de água consumida varia continuamente com variáveis como tempo, condições climáticas, hábitos da população, entre outros. Portanto é importante estabelecer coeficientes capazes de traduzir as variações de consumo para o dimensionamento das diferentes unidades de um sistema público de abastecimento de água (Macintyre, 1997).

O coeficiente k_1 representa o maior consumo diário e pode ser obtido através da relação entre os valores máximos e médios do consumo anual. Considerando-se que k_2 é o maior consumo por hora obtido através da relação entre a vazão horária máxima e o consumo médio diário, Macintyre (1997) apresenta os seguintes valores para estas constantes:

- k_1 : 1,1 a 1,4 (*adimensional*)
- k_2 : 1,5 a 2,3 (*adimensional*)

Os coeficientes previamente definidos são multiplicados e geram o coeficiente de correção e o coeficiente de variável instantânea K de acordo com a Eq. (5).

$$K = k_1 \cdot k_2 \quad (5)$$

Para o dimensionamento das diferentes unidades de um sistema público de abastecimento de água é necessário definir os valores das vazões médias \bar{Q} , vazão de consumo máxima diária Q_1 e a vazão de consumo máxima diária para as horas de maior demanda Q_2 . Esses coeficientes são definidos pelas Eqs. (6), (7) e (8).

$$\bar{Q} = \frac{P \cdot q}{3600 \cdot h} \quad (6)$$

onde:

\bar{Q} : Vazão média anual (m^3/s);
 P : População a ser atendida ou número de habitantes (*adimensional*);
 q : Taxa de consumo per capita ($m^3/habitantes/dia$);
 h : Tempo de funcionamento do sistema ou unidade considerada (s).

$$Q_1 = \frac{P \cdot q \cdot k_1}{3600 \cdot h} = k_1 \cdot \bar{Q} \quad (7)$$

onde:

Q_1 : Vazão de consumo máxima diária (m^3/s).

$$Q_2 = \frac{P \cdot q \cdot K}{3600 \cdot h} \left(\frac{L}{s} \right) \quad (8)$$

onde:

Q_2 : Vazão de consumo máxima diária para as horas de maior demanda (m^3/s).

Para o dimensionamento da malha ou redes ramificadas, uma vazão específica, que é a vazão medida, é considerada. Ao longo de um determinado segmento do sistema de distribuição, a vazão pode ser distribuída e obedecerá a Eq. (9):

$$q_m = \frac{n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot q}{86400} \quad (9)$$

onde:

q_m : Vazão de distribuição através da tubulação, durante o tempo de consumo do dia de maior demanda ($m^3/s/metro$ de tubulação)
 q : Vazão de água a ser distribuída por pessoa expressa em litros por 24 horas.
 n : Número médio de pessoas contempladas em função da extensão da rede de tubulações, dado pela Eq. (10).

$$n = \frac{P}{L_c} \quad (10)$$

onde:

L_c : Extensão da rede de tubulações (m).

Finalmente, o último objetivo do programa desenvolvido é o de criar uma interface amigável onde o projetista pode inserir os dados de projeto e analisar os dados de saída (vazões, pressões e diâmetros otimizados e não otimizados) através de gráficos e tabelas paramétricas.

2.2. Otimização do Custo Global do DHS

Ao final da modelagem, o circuito secundário é uma rede hidráulica que deve ser analisada como um conjunto. Para a otimização do custo global do sistema, leva-se em consideração o custo dos materiais e equipamentos para instalação e o custo da energia elétrica demandada para alimentação das bombas de escorva e recirculação. As variáveis independentes nesse caso são os diâmetros da tubulação em cada segmento da rede que devem ser otimizados para

reduzir o próprio custo da tubulação, no entanto, este procedimento pode acarretar a elevação da perda de carga nas tubulações e conseqüentemente uma maior potência demandada das bombas hidráulicas o que, necessariamente, leva a maiores custos das próprias bombas e da energia elétrica consumida.

Dessa forma, modela-se uma função “Custo Global” dependente da configuração de cada sistema, esta função é um somatório dos custos dos materiais, equipamentos necessários, energia elétrica e do diâmetro da tubulação em cada segmento da rede. Segundo Luenberger (2008), um método de otimização multivariável, conhecido como método do gradiente é altamente recomendado para este tipo de tratativa.

O método do gradiente é um método numérico iterativo de minimização de uma função de várias variáveis que começa o processo de iteração com um valor arbitrário para as variáveis independentes e calcula os novos valores das mesmas como sendo os valores que tendem a uma minimização da função, para isto o valor de cada variável é a soma do valor da iteração anterior com um passo que é proporcional ao gradiente da função no ponto em análise.

Matematicamente, seja $C(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$ uma função, *Custo Global*, dos diâmetros de tubulação $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ onde os índices $1, 2, 3, \dots, n$ representam cada segmento da rede com derivadas parciais contínuas. O ponto inicial da otimização é calculado com valores arbitrários para os diâmetros $d_{i,0}$ onde o índice i refere-se ao segmento da rede e o índice 0 enfatiza o fato de $d_{i,0}$ ser o valor inicial arbitrado. Os novos valores das variáveis são calculados pela Eq. (11):

$$d_{i,k} = d_{i,k-1} - \alpha \frac{\partial C}{\partial (d_{i,k})} \quad (11)$$

onde k é o índice da iteração corrente e α é uma constante de proporcionalidade cujo valor é aquele que minimiza uma função de segundo grau gerada pelo truncamento da série de Taylor da função custo original, no ponto $d_{i,k}$.

Como as variáveis independentes do modelo são variáveis discretas, visto que, somente foram considerados os diâmetros comerciais, o método do gradiente foi adaptado para atender, melhor, as exigências do programa e executar o processo de otimização com maior eficiência computacional. A adaptação traz uma mudança equivalente a utilizar valores para a constante α que, ao invés minimizar uma função que se aproxima da função real, calcula os novos valores de diâmetros que existem comercialmente imediatamente superiores ou inferiores ao valor da iteração corrente de acordo com o sinal das derivadas parciais relativas aos diâmetros. Para isso criou-se uma matriz para os diâmetros otimizados, onde a primeira coluna contém as dimensões dos diâmetros comerciais, a segunda coluna contém a posição do diâmetro da iteração corrente em relação à primeira. A terceira coluna contém o sinal positivo ou negativo das derivadas parciais. A terceira coluna indica a mudança do valor do diâmetro da linha correspondente para o diâmetro comercial imediatamente superior ou inferior ao calculado.

A função “Custo Global” foi modelada como sendo a soma dos custos da tubulação, acessórios, bombas e energia elétrica gasta durante o tempo de vida do sistema, onde todas estas parcelas foram descritas estatisticamente como sendo funções dos diâmetros das tubulações utilizadas. Os custos atribuídos à mão de obra, manutenção e instrumentação da instalação foram considerados independentes da configuração escolhida para o sistema e, portanto, não fazem parte da função “Custo Global”.

Os custos dos diversos materiais, equipamentos e acessórios da instalação foram modelados a partir de dados de fornecedores de materiais para rede hidráulica.

A Fig. (1) mostra um gráfico que relaciona o preço por metro de tubo de cobre com o diâmetro da tubulação.

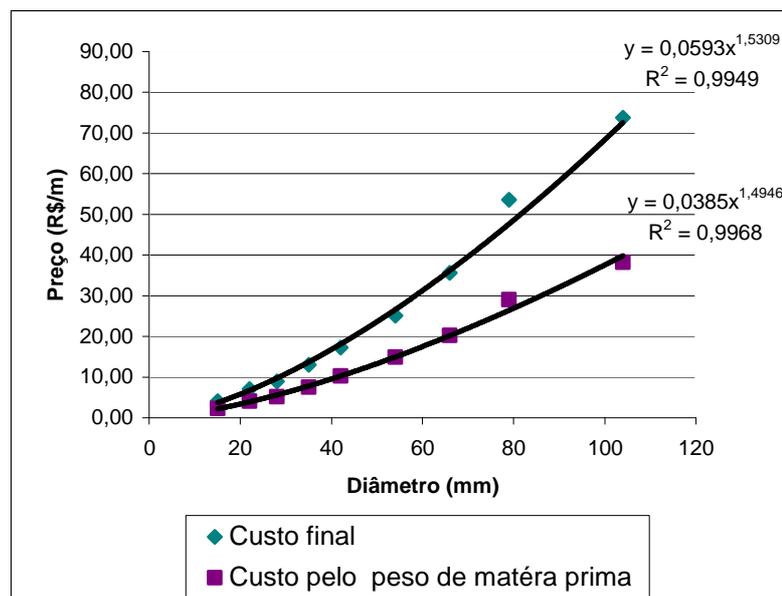


Figura 1. Correlações entre o custo de tubulação em R\$/m X Diâmetro Correspondente

A curva denominada por “Custo Final” é relativa aos valores reais de dados de fornecedores, enquanto, a curva denominada “Custo pelo peso de matéria prima” foi modelada através do peso dos tubos de acordo com London Metal Exchange (2009) e a cotação do dólar de acordo com Financeone (2010). A diferença entre as duas curvas foi atribuída ao preço de fabricação e comercialização dos tubos. Conforme apresentado no gráfico da Fig. (1), o custo por metro de tubulação apresenta coeficientes de determinação de 0,9949 e 0,9968, o que mostra a forte dependência do custo em relação ao diâmetro considerado.

Os modelos criados para calcular o custo dos diversos componentes da instalação na versão final do programa, permitem ao usuário atualizar as curvas da Fig. (1) através da inserção dos dados atuais de inflação, cotação do dólar e preço do cobre.

3. ANALISES E CONCLUSÕES

O algoritmo de otimização teve sua modelagem matemática elaborada através do programa Engineering Equation Solver® (EES) da F-Chart Software, ele utiliza as equações fluidodinâmicas para determinar as pressões, vazões e diâmetros em cada ponto da rede do circuito secundário (sub-ramais, ramais, prumadas de alimentação e retorno). O programa trabalha de forma iterativa através de equações, funções e procedimentos de análise e otimização, levando em consideração as orientações definidas pela legislação vigente e resultados empíricos.

O sistema distrital é dividido em circuito primário e secundário. O circuito primário é a fonte geradora e o armazenamento de energia, neste caso a água quente. O circuito secundário é a rede de distribuição de água quente para os consumidores e é dividido em: sub-ramais, ramais, prumadas de alimentação e retorno. A Fig. (2) representa a configuração usada para o circuito secundário onde a primeira casa, dos blocos 1 e 2, é considerada como sendo a casa mais próxima do circuito primário. Assim, a quarta e última casa é considerada como sendo a mais distante do circuito primário. A partir desta configuração, a modelagem foi realizada e implementada.

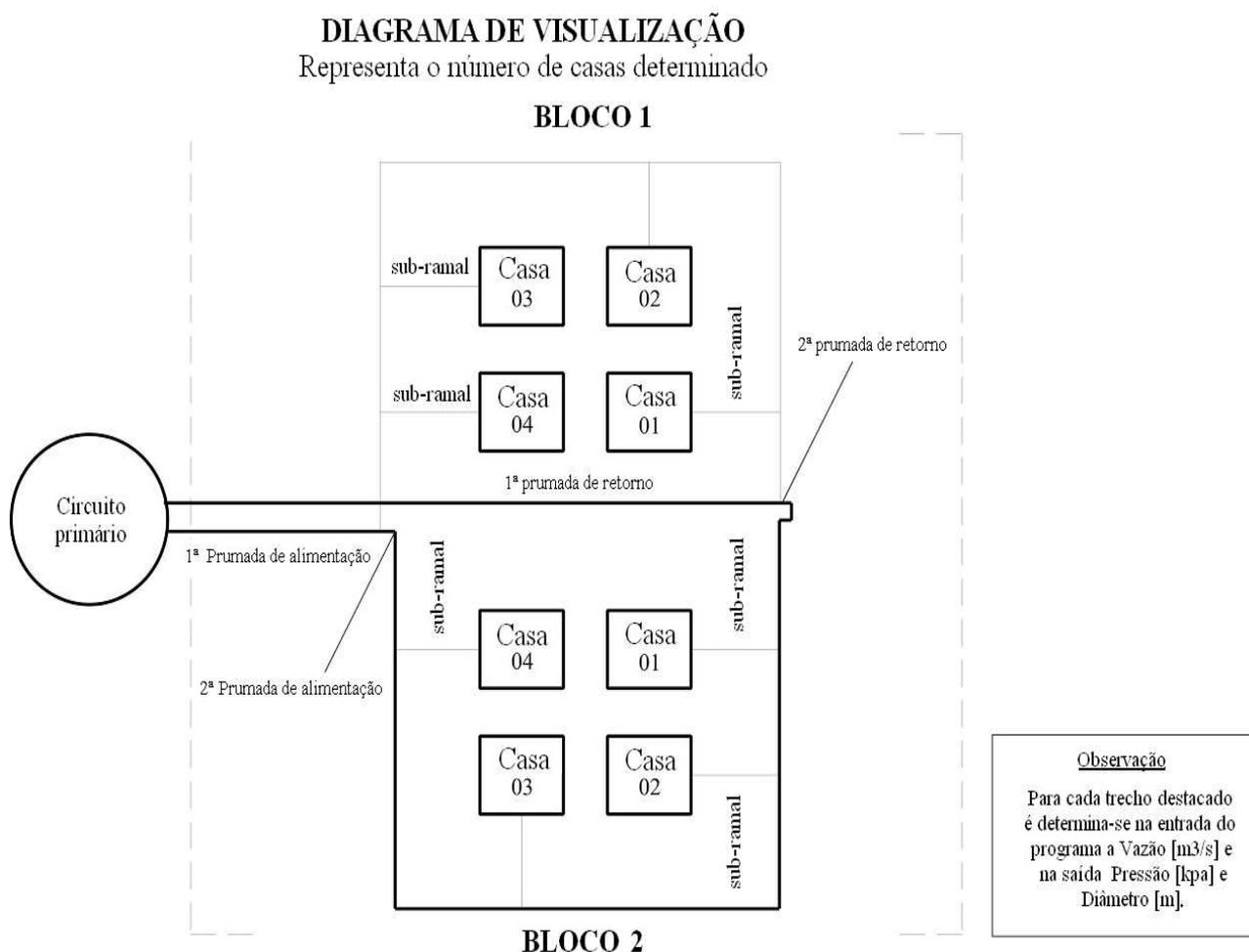


Figura 2. Diagrama esquemático do circuito secundário

A Interface gráfica, criada com o auxílio do Borland® C++ Builder™, agiliza a entrada de dados estruturais pelo usuário e organiza os resultados, facilitando o seu acesso e compreensão, através de gráficos e tabelas paramétricas de cada parte do sistema em análise. A Fig. (3) apresenta a tela principal do programa, ambiente em que o usuário inicia a modelagem da instalação, inserindo informações como o número de quarteirões e número de casas de cada quarteirão.

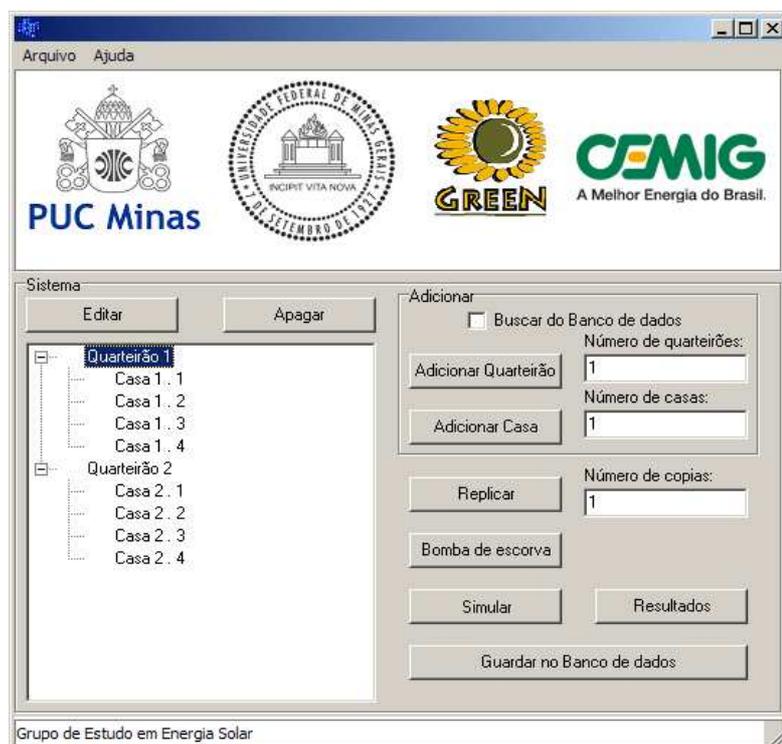


Figura 3. Tela principal do programa

Para a análise e avaliação das grandezas físicas em algum ponto do circuito secundário, o usuário disponibiliza de um ambiente de análise para visualizar graficamente informações como vazão, pressão e temperatura, conforme a Fig. (4). Desta forma, facilita-se a detecção de pontos críticos da instalação. As variáveis mostradas na Fig. (4) podem ser esboçadas graficamente em qualquer ordem ou combinação de interesse.

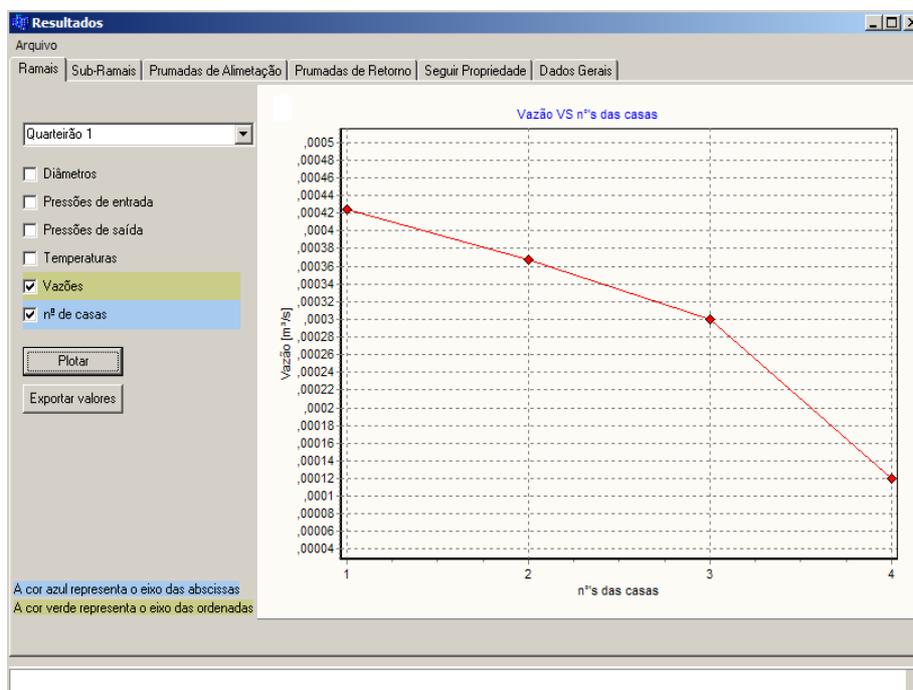


Figura 4. Análise de resultados

Finalmente, para a otimização dos custos de instalação, a função de otimização desenvolvida pelo método do gradiente, para a configuração mostrada na Fig. (2), revela uma redução de custos bastante considerável. Inicialmente, o custo total de instalação (método não otimizado) é da ordem de R\$32.800,00, posteriormente, o custo total de instalação (método otimizado), é da ordem de R\$24.600,00, o que representa 25% de redução. A Fig. (5) mostra a evolução do processo de otimização.

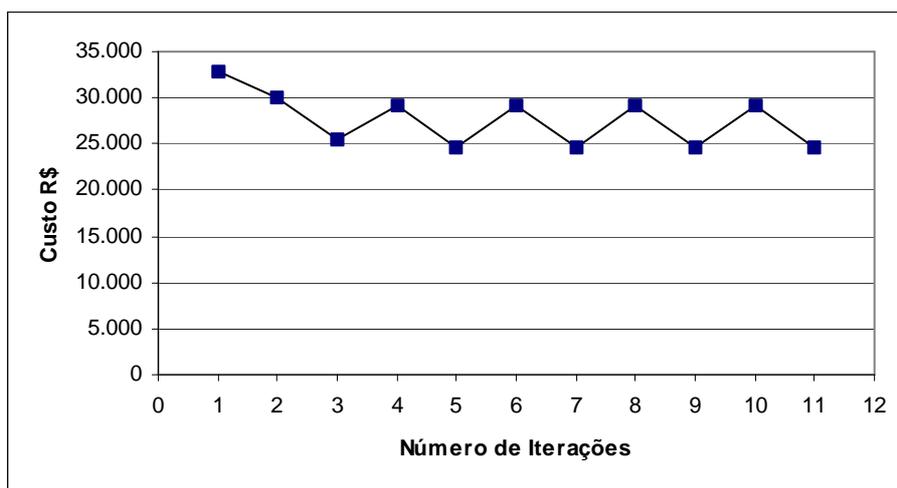


Figura 5. Evolução do processo de otimização

Os custos na ordenada do gráfico se referem a custos de compra de todos os equipamentos e acessórios necessários à construção do circuito secundário, exceto os de instrumentação, controle e os gastos com energia elétrica de bombeamento durante os 20 anos de vida útil do sistema, com as devidas correções das variações causadas pelos juros e inflação. Como pode ser visto pela Fig. (5) o método utilizado apresentou grau de convergência bastante satisfatório visto que na terceira iteração o custo da instalação já apresenta praticamente seu valor otimizado, sendo que, nas iterações subsequentes, o método tende a estabilizar os valores mínimos de custo. Deve-se ressaltar que a amplitude de oscilação relativamente alta, percebida ao fim do processo, deve-se ao fato de que as variáveis de otimização (diâmetros) são discretas, assim, qualquer mudança nessas variáveis podem levar a variações relativamente altas no custo, porém, a rápida convergência e a saída de dados já compatíveis com os diâmetros comerciais existentes mostram a grande adequação do método para este tipo de aplicação.

Várias publicações foram consultadas e utilizadas como base para o projeto hidráulico e otimização de funções e procedimentos incluídos no programa. Entre eles destacam-se, uma investigação numérica de uma única tubulação de um sistema de aquecimento distrital foi analisada por Lippke (1996) onde, o autor, esboça os principais problemas possíveis de ocorrerem, como por exemplo, recirculação de fluido. Evaporações em tubos paralelos foram investigadas primeiramente para vazão em tubos verticais pois não havia interesse neste tipo de investigação para tubos horizontais. O autor demonstra o perigo em desenvolver DHS's que operem com temperaturas maiores do que 90°C para a água. Segundo o autor, o recomendado é que se mantenha uma temperatura não superior à 80°C nas tubulações do circuito secundário e, caso seja necessário, fazer um reaquecimento desta água no ponto de consumo.

Bojic et al (2000) investigaram uma estratégia de otimização para minimizar os problemas causados pelas mudanças de três características de um DHS: Resistência hidráulica da rede secundária de tubos, transmitância de calor de radiadores dentro das construções e a transmitância de calor no isolamento das construções. A estratégia de otimização do problema consiste no ajuste da resistência hidráulica de válvulas existentes, recirculação entre o sistema de aquecimento local e uma nova subestação trocadora de calor, além de bombas adicionais. Utiliza-se uma seqüência linear de programação em regime permanente para encontrar uma estratégia de minimização ótima. Por exemplo, combinação ótima da resistência hidráulica de válvulas, novos lugares para as bombas e novos tamanhos de subestações trocadoras de calor.

Heller (2002) desenvolve um modelo de sistema dinâmico para avaliação do comportamento hidráulico de Sistemas de Aquecimento Distrital. Os resultados desta simulação foram então comparados com os resultados de métodos alternativos encontrados na literatura. O método, no entanto, envolve muitos parâmetros que podem levar a erros e incertezas. Portanto, se o conhecimento de parâmetros específicos for raro, o método degree-day pode levar a resultados realísticos. O autor conclui que para baixa energia e área de construção solar otimizada, o método energy-signature leva a resultados razoáveis e se um amplo sistema de dados de entrada for conhecido, o método energy-signature pode até ser melhor do que o método degree-day.

Alkhahaileh et al (2003) apresenta o desenvolvimento de uma modelagem, simulação e análise de um sistema solar para aquecimento de solo. A simulação computacional desenvolvida foi utilizada para estudar o potencial de se usar tal sistema sob as condições climáticas da Jordânia. Foi encontrado que, o sistema de aquecimento solar pode atender a maior parte do inverno da Jordânia com uma fração solar de 80 a 100 % por pelo menos dois meses da estação. Deve-se enfatizar que a viabilidade de tal sistema é para sua utilização em sistemas de aquecimento distrital e não para casas individuais, devido às limitações econômicas do alto custo capital deste sistema solar em pequenas aplicações domésticas.

Lu et al (2005) apresentam um método prático para otimizar seções internas de edificações com sistemas de Aquecimento Centralizado, Ventilação e Ar Condicionado (HVAC) que consistem de *loops* internos de ar e *loops* de água resfriada. Primeiramente, através da análise das características de cada componente, modelos matemáticos

associados a cargas de resfriamento e consumo de energia em trocadores de calor e em outros dispositivos são estabelecidos. Considerando a variação da carga de resfriamento de cada usuário final, um sistema de inferência Neuro-Fuzzy é empregado para modelar dutos e redes de tubos e obter pontos de pressão diferencial ótima baseado em informações de sensores limites. Uma otimização não linear restrita de integração mesclada para um sistema de energia é formulada e solucionada por um algoritmo não linear modificado. O principal aspecto deste artigo é obter uma aproximação sistemática na otimização do consumo de todo o sistema de energia ao invés de cada componente individualmente. Um estudo de simulação para um sistema centralizado HVAC típico é fornecido para comparar o método de otimização proposto com alguns métodos tradicionais. Os resultados mostram que o método proposto, de fato, melhora significativamente a performance do sistema.

Söderman e Pettersson (2006) avaliaram a utilização de um modelo de otimização estrutural e operacional de um Sistema de Energia Distribuído (SED). No modelo são levadas em consideração a produção, transmissões de potência, transporte de combustível para as plantas de produção, transporte de água nas tubulações do aquecimento distrital e armazenamento de calor. O problema é formulado como uma programação linear, problema este onde o objetivo é minimizar os custos totais do SED. O modelo desenvolvido fornece soluções realísticas que podem ser usadas como uma base para o projeto de um sistema regional de energia distribuída.

Gabrielaitiene et al (2007) apresentam uma modelagem da dinâmica das temperaturas de um sistema de aquecimento distrital que é tipicamente validada para um único tubo ou um sistema de tubos com informações limitadas sobre a dinâmica do comportamento dos consumidores. No presente trabalho, as informações de consumo dependentes do tempo do sistema de aquecimento distrital da cidade de Naestved/Dinamarca foram usadas para investigar a capacidade de ferramentas de modelagem para representar a distorção do perfil de temperaturas através de uma rede inteira de um sistema de aquecimento. O sub-sistema de aquecimento distrital de Naestved foi modelado através de duas aproximações (O *Método do Nó* desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca e o programa TERMIS) e os resultados das modelagens foram comparados com as informações medidas. Os resultados indicaram que as discrepâncias entre as temperaturas previstas e medidas são nítidas para os consumidores localizados nas tubulações mais distantes que contêm muitas curvas e acessórios. Adicionalmente, foi encontrado que a representação do comportamento do consumidor sobre uma média anual, introduz um desvio entre as temperaturas de retorno previstas e medidas na fonte de calor.

Robinson et al (2007) descreveram o desenvolvimento e a aplicação de uma ferramenta inédita de apoio a projetistas na otimização da sustentabilidade de centros e/ou vizinhanças urbanas. Seu estudo introduz: (i) a arquitetura do programa, (ii) um solver integrado e inovações relacionadas a: modelagem de trocas térmicas, modelagem estocástica da presença e comportamento de ocupantes e a modelagem de plantas urbanas, (iii) projeto e inovações na interface das edificações, (iv) métodos de análise de resultados. Finalmente o programa é aplicado para demonstrar o desenvolvimento das diretrizes de planejamento urbano como também o projeto de um plano mestre.

Stevanovic et al (2007) apresentaram um método eficiente para análise e simulação numérica, em regime permanente, da hidráulica de redes complexas de tubulações. Este modelo é baseado no método dos *loops* das redes e no método das raízes quadráticas para resolver um sistema de equações lineares. O procedimento é executado em uma forma matemática compreensiva que pode ser diretamente programada em um software computacional. Uma aplicação do método para a análise da eficiência energética de sistemas reais complexos de aquecimento distrital é demonstrada. Os resultados obtidos mostram o potencial de economia de energia em operação e manutenção de bombas hidráulicas. Demonstra-se que o método proposto é consideravelmente mais eficiente do que o modelo de Hardy-Cross amplamente utilizado. Devido à sua fácil implementação e alta eficiência, o método apresentado pelos autores é recomendado para cálculos hidráulicos, em regime permanente, de redes complexas.

Lee e Strand (2008) desenvolveram um novo modelo e implementaram no programa Energy Plus® para simulação de tubulações enterradas. O modelo foi validado e mostrou uma boa concordância com os dados experimentais e teóricos. Usando o novo modelo, uma análise paramétrica foi conduzida para investigar os efeitos do raio, comprimento e taxas de vazão de ar nas tubulações enterradas, sobre o rendimento total destas tubulações em várias condições durante o inverno. O comprimento e profundidade mostram serem relevantes sobre a taxa de resfriamento geral das tubulações enterradas enquanto que o raio e a taxa de vazão de ar afetam principalmente a temperatura de entrada do fluido na tubulação. Os potenciais de resfriamento e aquecimento das tubulações enterradas em 4 diferentes localizações também foram investigados. Segundo os resultados dos autores, o fato de uma tubulação estar enterrada ou não, torna-se bastante pertinente para a performance geral da instalação e depende fortemente das condições climáticas do local. Lin e Ebadian (2008) apresentam em seu artigo, um modelo algébrico simplificado 3-D para se obter uma solução numérica de um fluxo qualquer de água com areia. A fim de se obter, a partir do estudo uma solução numérica precisa para um fluxo turbulento totalmente desenvolvido, o modelo turbulento RNG $K-\epsilon$ foi usado juntamente com o modelo de mistura algébrico. Uma malha não estruturada e não uniforme foi escolhida para discretizar todo o domínio computacional e um método de diferenças finitas com controle de volume foi aplicado para resolver as equações governantes. A média dos gradientes de pressão obtida a partir da solução numérica no fluxo turbulento totalmente desenvolvido foi comparada com as medidas experimentais e com a extensa literatura consultada para validar os resultados da simulação. As soluções encontradas estão coerentes com as informações experimentais. As investigações numéricas focaram-se principalmente em ilustrar e comparar os processos desenvolvidos para fração volumétrica e distribuição de densidades, perfil médio das velocidades e distribuição dos coeficientes de atrito na região de entrada. Verificou-se que a diferença entre os resultados dos fatores de atrito aumenta na direção do fluxo na maior parte da região de entrada.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio financeiro.

5. REFERÊNCIAS

- Alkhahaileh T. M., Atieh A. K., Nasser G. N. e Jubran B. A., 2003, "Modeling and simulation of solar pond floor heating system", *Renewable Energy*, Vol. 18, pp. 1-14.
- Bojic M., Trifunovic N. e Gustafsson S.I., 2000, "Mixed 0-1 sequential linear programming optimization of heat distribution in a district-heating system", *Energy and Buildings*, Vol. 32, pp. 309-317.
- Financeone, 2010, "Cotação Dólar", Disponível em: www.financeone.com.br.
- Gabrielaitiene I., Bohm B. e Sundén B., 2007, "Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark – A case study", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 78-86.
- Heller A. J., 2002, "Heat-Load modelling for large systems", *Applied Energy*, Vol. 72, pp. 371-387.
- Iea - International Energy Agency, 2008, "Renewables Information 2008 with 2007 data".
- Lee H. K. e Strand R. K., 2008, "The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 486-494.
- Lin C. X. e Ebadian M. A., 2008, "A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe", *Computers & Fluids*, Vol. 37, pp. 965-94.
- Lippke F., 1996, "Direct steam generation in parabolic trough solar power plants: Numerical investigation of the transients and the control of once-through system", *Solar Energy*, Vol. 118, pp. 9-14.
- London Metal Exchange, 2009, "Non-ferrous metals", Disponível em: www.lme.com.
- Lu L., Wenjian C., Xie L., Li S. e Soh C. Y., 2005, "HVAC system optimization-in building section", *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 11-22.
- Luenberger D.G., 2008, "Linear and Nonlinear Programming", Stanford University, Second Edition.
- Macyntire A. J., 1997, "Bombas e instalações de bombeamento", Segunda Edição.
- Procel/Eletrabras, 2005, "Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia", Disponível em: www.eletrabras.com.
- Robinson D., Campbell N., Gaiser W., Kabel K., Le-Mouel A. e Morel N., 2007, "SUNtool – A new modeling paradigm for simulating and optimising urban sustainability", *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 1196-1211.
- Samorka, 2008, "Icelandic Energy and Utilities", Disponível em: www.samorka.is.
- Söderman J. e Pettersson F., 2006, "Structural and operational optimization of distributed energy systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 1400-1408.
- Stevanovic V. D., Prica S., Maslovaric B., Zivkovic B. e Nikodijevic S., 2007, "Efficient numerical method for district heating system hydraulics", *Energy Conversion e Management*, Vol. 48, pp. 1536-1543.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SOFTWARE FOR OPTIMIZED MODELING OF THE SECONDARY CIRCUIT OF DISTRICT HEATING SYSTEMS

Lucas Paglioni Pataro Faria, lppf@ig.com.br¹
Elizabeth Marques Duarte Pereira, bethduarte00@gmail.com²
Rudolf Huebner, rudolf@ufmg.br¹
Bruno Marciano Lopes, bruno.marciano@cemig.com.br³
Alexandre Salomão Andrade, alexandresalomao@ig.com.br⁴
Ivan Magela Corgozinho, ivanmagela@yahoo.com.br⁴
José Marcos Chaves Barbosa, zemarcoscb@yahoo.com.br⁴

¹Federal University of Minas Gerais, School of Engineering, Antônio Carlos Avenue, Nº. 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

²University Center UNA, Raja Gabáglia Avenue, Nº. 3.950, Estoril, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

³Energetic Company of Minas Gerais (CEMIG), Barbacena Avenue, Nº. 1200, Santo Agostinho, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

⁴Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Dom José Gaspar Avenue, Nº. 500, Building 50, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. The district heating systems (DHS) are widely used in northern Europe countries, such as Iceland, where about 90% of homes are served by a network of 29 district systems whose energy comes from geothermal. On the other hand, in countries like Denmark, the penetration of the district system reaches 50% of the population, including a distribution line of products from approximately 20,000 km. In Germany the penetration reaches 12% of DHS, where 46% of energy for the residential sector, 36% to commercial sector and 18% to the industrial sector. However, in developing countries this technology is innovative, especially to meet the demand of hot water in social interest houses. The scope of this work is motivated by the increase in the number of solar heaters installed by the government in recent years in the joint housing of the low income population in Brazil, the technical challenges inherent in the deployment of these systems from the development of new models of sustainability technology. These models aim to minimize the sale of equipment after occupation by the residents and ensure better conditions for operation/maintenance of the systems over their lifetime. Initially, a survey was made of typical types of combination of houses adopted in the State of Minas Gerais/Brazil for homes with built area of around 40m², 4 residents and family income of 3 minimum wages (U.S.\$ 500.00). For the establishment of minimum criteria to be adopted in selecting the type of optimization, such as minimizing the required recycling, energy consumption in pumping, the diameter of the pipes at the secondary circuit and thermal losses in distribution consolidation of gains and identifying the disadvantages of each configuration founded. The final version, already concluded is developed on the softwares EES (Engineering Equation Solver) and Borland C++ Builder®, is based on the equations of energy, momentum and mass conservation and has by objective: 1) Size of the diameters in the optimum way to the supply and return pipes (sub branches and branches) ensuring the lowest possible cost of installation; 2) Determine the pressure loss in each section of the network checking the need of installation of water pumps for recirculation. The program provides a friendly and iterative platform in order to allow the user quick and reliable results. The final version of the program implements in the previous algorithm the equations of heat transfer by providing the inherent thermal losses in the pipes and connections. 3) Implementation of the equations of heat transfer obtained and hence heat losses inherent in the pipes and connections. The program interface presents a friendly and interactive platform to allow the user rapid and releable results.

Keywords: *Energy, Solar, Heating, District and Optimization.*

COPYRIGHT

The authors are solely responsible for the content of the printed material included in this work.