UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

STEVIE BRUNO DE LIMA SOUZA

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS USANDO UM MÉTODO HÍBRIDO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

RECIFE

2017

STEVIE BRUNO DE LIMA SOUZA

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS USANDO UM MÉTODO HÍBRIDO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos e Sistemas Térmicos

Orientador: Prof. Dr. Fabio Santana Magnani

RECIFE

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S729o Souza, Stevie Bruno.
Otimização de sistemas térmicos usando um método híbrido baseado na programação linear inteira mista / Stevie Bruno Souza. - 2017.
82 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Santana Magnani.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. MILP. 3. Otimização. 4. Sistemas térmicos. 5. Valor presente líquido. I. Magnani, Fabio Santana (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2017-342

31 de agosto de 2017

"OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS USANDO UM MÉTODO HÍBRIDO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA"

STEVIE BRUNO DE LIMA SOUZA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

_____
Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI
ORIENTADOR/PRESIDENTE

_____
Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

_____
Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)

_____
Prof. Dr. GABRIEL ALVES DE ALBUQUERQUE JUNIOR (UFRPE)

_____
Prof. Dr. RAMIRO BRITO WILLMERSDORF (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na figura do coordenador do programa, demais professores, funcionários e colegas pelo ambiente favorável ao aprendizado e disseminação do conhecimento.

Ao professor Fábio Magnani pela pela orientação e apoio durante todo o curso. Aos colegas do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos que trabalharam como uma verdadeira equipe por toda ajuda.

Aos meus familiares e amigos por todo incentivo e apoio.

"Experiência não é o que acontece com um homem;
é o que um homem faz com o que lhe acontece."
(Aldous Huxley)

RESUMO

O dimensionamento de sistemas térmicos que consigam atender as demandas energéticas de energia elétrica (E), vapor (S) e água gelada (W) com o melhor retorno financeiro para o investidor é uma tarefa difícil, pois existem diversas configurações de equipamentos possíveis, com diversos modos de operação. A otimização desses sistemas é normalmente feita utilizando métodos que se baseiam no estudo numérico. O presente trabalho vem propor uma nova metodologia de otimização híbrida baseada na programação linear inteira mista (MILP), com foco no aumento da velocidade de otimização em relação aos métodos que utilizam o processo híbrido de programação linear e busca exaustiva (BE/PL). O procedimento de otimização busca maximizar o VPL (Valor Presente Líquido) do sistema e consiste em 5 passos: proposta do sistema genérico, pré-seleção dos equipamentos, aplicação do MILP, busca selecionada e programação linear. A fim de verificar a performance do novo método, foram realizados estudos paramétricos variando a tarifa de energia elétrica entre 40% e 200%. O novo método obteve uma redução de 95,8% no tempo de otimização se comparado ao método híbrido que utiliza a busca exaustiva (BE/PL) e obteve os mesmos resultados de potência e VPL.

Palavras chave: MILP. Otimização. Sistemas térmicos. Valor presente líquido.

ABSTRACT

The design of thermal systems that meet the energy demands of eletricity (E), steam (S) and cold water (W) with the best financial return to the investor is a difficult task, since there are several configurations of possible equipment, with different operating modes. Optimization of these systems is usually done using methods that are based on numerical study. The present work proposes a new optimization methodology based on mixed integer linear programming (MILP), focusing on the increase in the optimization speed in relation to the methods that use the hybrid process of linear programming and exhaustive search (BS/PL). The optimization procedure seeks to optimize the VPL (Net Present Value) of the system and consists of 5 steps: generic system proposal, pre-selection of equipment, application of MILP, selected search and linear programming. In order to verify the performance of the new method, parametric studies were carried out varying the electricity tariff between 40% and 200%. The new method obtained a reduction of 95.8% in the optimization time when compared to the hybrid method (BE/PL) and obtained the same results of power and NPV.

Keywords: MILP. Optimization. Thermal systems. Net present value.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema Geral 18
Figura 2 – Utilização ótima de combustível para o distrito sem o limite de CO_2 . 29
Figura 3 – Perfomance dos algoritmos para diversas etapas de tempo, variando de 1 semana a 1 ano 30
Figura 4 – Resultado da otimização por partes em aproximações lineares com 5,10 e 20 intervalos 32
Figura 5 – Redução no tempo de payback de um sistema CHP com a aplicação de incentivos econômicos em um hospital 33
Figura 6 – Modelo da planta simulada em C++ 38
Figura 7 – Equipamentos e transformações de energia 40
Figura 8 – Equipamentos globais 42
Figura 9 – Junções 42
Figura 10 – Separações 43
Figura 11 – Fontes 43
Figura 12 – Sumidouros 44
Figura 13 – Descarte 44
Figura 14 – Bloco com rótulo 45
Figura 15 – Definição do bloco vizinho 45
Figura 16 – Definição da porta do bloco vizinho 45
Figura 17 – Distribuição horária de energia elétrica para os dias úteis e sábados (a) e para os domingos (b). 46
Figura 18 – Curva de carga térmica destinada ao sistema de ar condicionado para os dias úteis e sábados (a) e para os domingos (b). 47
Figura 19 – Equipamento global 53
Figura 20 – Representação dos blocos a partir de suas características 57
Figura 21 – Modelo gráfico do arquivo em *Excel* 59
Figura 22 – Desenvolvimento do método híbrido baseado no MILP 63
Figura 23 – Evolução de VPL como função da tarifa de energia elétrica para o Método 1. As referências a-d indicam a topologia do sistema ideal em cada situação, conforme mostrado na Figura 24. 65
Figura 24 – Sistema ótimo para as diferentes faixas de β (a-d) 67
Figura 25 – Funcionamento do motor em função do tempo para $\beta = 1,2$ para os Métodos 1 e 3 70
Figura 26 – Funcionamento do motor em função do tempo para $\beta = 1,3$ para os Métodos 1 e 3 71

Figura 27 – Funcionamento do motor em função do tempo para β =1,1 com a aplicação do Método 2 74
Figura 28 – Funcionamento do motor em função do tempo para β = 1,1 com a aplicação dos Métodos 1 e 3 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos motores primários 27
Tabela 2 – Características dos equipamentos ativados termicamente 27
Tabela 3 – Comparativo entre as estratégias FEL, FTL e HET 28
Tabela 4 – Produção anual de eletricidade e emissão de CO_2 29
Tabela 5 – Fluxo externo de energia elétrica no sistema CHP da cidade de Linkoping 30
Tabela 6 – Tempo computacional dos algoritmos para diferentes etapas de tempo, variando de 1 semana a 1 ano 30
Tabela 7 – Curvas normalizadas para turbina à gás (GT), motor de combustão interna (ICE), bomba de calor (HP) e para caldeiras auxiliares (AB) 31
Tabela 8 – Politicas de incentivo para os diversos estados americanos 32
Tabela 9 – Carga elétrica e térmica anual para diferentes construções de referência 32
Tabela 10 – Sumário da análise de incentivo para um hospital de referência . . 33
Tabela 11 – Resultados das duas opções 35
Tabela 12 – Críterios de investimento, expressões, usos e limitações 36
Tabela 13 – Exemplo de matriz auxiliar de posicionamento 49
Tabela 14 – Exemplos de matrizes geradas a partir da matriz de posicionamento 50
Tabela 15 – Exemplo de potências pré-selecionadas 55
Tabela 16 – Potências que serão permutadas 56
Tabela 17 – Características dos 3 blocos utilizados como exemplo 56
Tabela 18 – Resultados das simulações com o C++, *Excel* e *Matlab* 59
Tabela 19 – Tarifas elétricas combinadas 60
Tabela 20 – Custos de investimento financeiro e ambiental dos equipamentos . 61
Tabela 21 – Rendimentos dos equipamentos 61
Tabela 22 – Preço de venda interna e externa de energia, água gelada e vapor . 62
Tabela 23 – Potências pré-selecionadas 65
Tabela 24 – Potências escolhidas pelo método 1 em função do fator (β) 66
Tabela 25 – Modo de operação do sistema para os diversos valores de β nos métodos 1 e 3 68
Tabela 26 – Potências escolhidas pelo método 2 em função do fator (β) 69
Tabela 27 – Modo de operação do sistema para os diversos valores de β para o método 2 69
Tabela 28 – VPL em função do β 72
Tabela 29 – Investimentos iniciais e valores operacionais dos 3 métodos 72

Tabela 30 – Diferença percentual do VPL do método 2 em relação aos métodos 1 e 3 73
Tabela 31 – Comparação entre os Métodos 1, 2 e 3 73
Tabela 32 – Potências escolhidas pelos métodos em função do fator (β) 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BE/PL	Busca exaustiva e programação linear
BS/PL	Busca seletiva e programação linear
CCHP	Geração combinada de resfriamento, calor e potência
CHP	Geração combinada de calor e potência
CELPE	Companhia energética de Pernambuco
COP	Coeficiente de desempenho
DER	Estratégia de energia distribuída
EMOO	Algorítimo evolutivo multi-objetivo
FEL	Estratégia de funcionamento baseada na carga elétrica
FTL	Estratégia de funcionamento baseada na carga térmica
GLPK	Kit de programação linear GNU
HAVAC	Tecnologia de condicionamento de ar, ventilação e aquecimento
HECHAPPO	Otimizador heurístico de plantas de geração combinada de calor e potência
HET	Estratégia de Funcionamento híbrida
HP	Bomba de calor
LOST	Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos
MILP	Programação inteira mista
MODEST	Modelo para otimização de sistemas dinâmicos energéticos com componentes que dependem do tempo e das condições de contorno
TIR	Taxa interna de retorno
VPL	Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

AB	Caldeiras auxiliares
AC	*Chiller* de absorção
CC	*Chiller* de compressão
E	Demanda de energia elétrica
EB	Caldeira elétrica
EG	Rede pública de distribuição elétrica
n	Número de meses
FL	Linha de combustível
GB	Caldeira a gás
GHG	Gases de efeito estufa
GT	Turbina a gás
h	Horas
i	Taxa de Juros
ICE	Motor de combustão interna
k	Tarifa
n	Número de meses
N	Potência nominal
PL	Programação linear
PG	Motogerador
RB	Caldeira de recuperação
S	Demanda de vapor
SM	Distribuidor de vapor
VE	Custos do consumo de combustível e energia elétrica

VI	Investimento Inicial
x	Linhas de energia
W	Demanda de água gelada
μ	Fator de valor presente
η	Eficiência
high	Demanda no horário de ponta
low	Demanda no horário fora de ponta
sell	Venda de energia
fuel	Combustível
energy	Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Sistemas Térmicos 17
1.2 Objetivo Geral 19
1.3 Objetivos Específicos 19
1.4 Estrutura da Dissertação 19

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 21
2.1 Análise Financeira 21
2.2 Programação Linear 22
2.2.1 Modelo Matemático 23
2.2.2 Forma Matricial 23
2.3 Programação Linear Inteira Mista 24

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 26
3.1 CCHP e MILP 26

4 MODELAGEM E DADOS 37
4.1 Modelagem Física 37
4.1.1 Equipamentos 39
4.1.2 Características de um Equipamento Global 39
4.1.3 Classificação dos Blocos 41
4.1.4 Ligações 44
4.1.5 Curvas Horárias de Demanda 45
4.2 Modelagem Matemática 47
4.2.1 Função Objetivo - Valor Presente Líquido (VPL) 47
4.2.2 Montagem das Restrições 49
4.2.3 Restrições 50
4.3 Método Híbrido Baseado no MILP (BS/PL) 52
4.3.1 Exemplo de Modelagem 56
4.4 Verificação da implementação do MILP 58
4.5 Dados Financeiros 59
4.5.1 Energia Elétrica 60
4.5.2 Gás Natural 60
4.5.3 Custos de Investimento e Eficiências dos Equipamentos 61
4.5.4 Venda Interna e Externa de Energia 61

5 ESTUDOS DE CASO 63
5.1 Métodos de Otimização 63
5.2 Otimização do Sistema - Método 1 (BE/PL) 64
5.3 Otimização do Sistema - Método 2 (MILP) 68
5.4 Otimização do Sistema - Método 3 (BS/PL) 70
5.5 Comparação entre os Métodos 71
5.5.1 Comparação Financeira 71
5.5.2 Comparação Técnica 73

6 CONCLUSÕES 76
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros 77

REFERÊNCIAS 78

APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS UTILIZADAS NO *EXCEL* . 81

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas térmicos tem como principal objetivo suprir demandas energéticas exigidas em processos industriais e centros urbanos. As principais demandas energéticas são: energia elétrica (E - *Electric Energy*), vapor (S - *Steam*) e água gelada (W - *Cold Water*). Os sistemas mais utilizados são chamados de CCHP (*combined cooling, heat and power*), que são interessantes opções para suprir diferentes serviços em distritos urbanos e grandes edifícios. Os sistemas CCHP utilizam a energia dos combustíveis de maneira mais eficiente, pois o calor da cogeração pode ser utilizado para aquecer no inverno, ou para refrigerar no verão, através de um *chiller* de absorção.

A escolha de um sistema CCHP deve considerar diversos fatores, como: (i) tarifas de energia; (ii) custos de investimento e performance dos diferentes componentes; (iii) diferentes demandas energéticas; e (iv) restrições legais sobre eficiência energética. A variações diárias e sazonais das demandas de frio e calor são os fatores que mais influenciam no dimensionamento desse sistema (número de caldeiras, número de *chillers*, potência dos equipamentos, etc). Esses sistemas são selecionados considerando a análise hora-hora das demandas durante um ano, normalmente em termos econômicos. Neste tipo de análise, existem muitas soluções possíveis, com diferentes modos de operação, resultando em um problema complexo e difícil de resolver (LOZANO; RAMOS; SERRA, 2010). A métrica utilizada para dimensionar esses sistemas é geralmente o VPL, que é obtido pela soma de todos os valores futuros de fluxo de caixa, trazidos para a data presente, com o valor do investimento inicial do projeto.

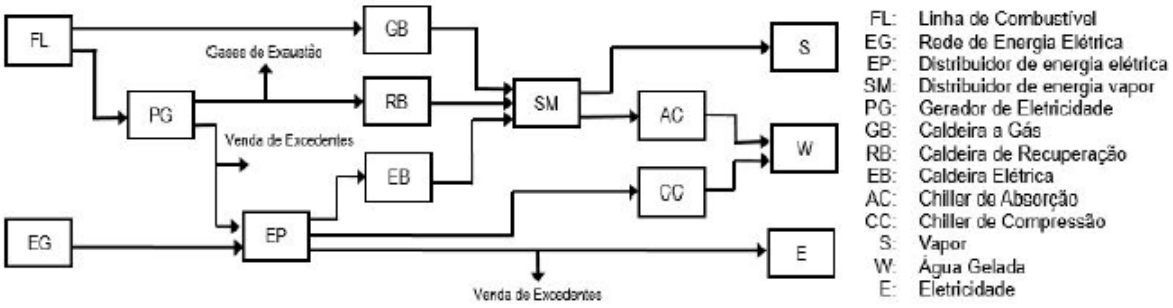
Para a otimização dos sistemas térmicos, os métodos mais utilizados são baseados em programação linear, MILP (*Mixed Interger Linear Programming*), MINLP (*Mixed Interger Nonlinear Programming*) e em métodos heurísticos. Nesta dissertação, um novo modelo de otimização foi desenvolvido utilizando a MILP, com o objetivo de reduzir o tempo de otimização em relação ao método híbrido (BE/PL) estudado por Hornsby (2014).

1.1 Sistemas Térmicos

O sistema geral adotado para o estudo, mostrado na Figura 1, tem como objetivo suprir as demandas de energia elétrica, água gelada e vapor. A demanda de água gelada pode ser suprida por um *chiller* de absorção (AC), que utilizará parte do vapor gerado para a produção de água gelada, e/ou por um *chiller* de compressão (CC), que

utilizará a energia elétrica do motogerador (PG) e/ou da rede para gerar água gelada. A demanda elétrica é suprida através da rede de distribuição (EG) e/ou um grupo motogerador, que fará a conversão da energia gerada pela queima do combustível. A demanda de vapor pode ser suprida pelo acionamento de uma caldeira a gás (GB), uma caldeira elétrica (EB) e/ou uma caldeira de recuperação (RB).

Figura 1 – Sistema Geral



Fonte: Adaptado de (HORNSBY, 2014)

Um sistema térmico pode ser classificado como convencional ou de cogeração. O sistema convencional faz uso da energia elétrica da rede para atender à demanda de eletricidade e para acionar o *chiller* de compressão para produção de água gelada, e, a produção de vapor ocorre pela queima de combustível na caldeira a gás. O sistema de cogeração é aquele onde ocorre o aproveitamento local do calor residual originado dos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica que, de outra forma, seria desperdiçado, como no caso em que os gases quentes gerados durante a queima do combustível são utilizados em uma caldeira de recuperação para gerar vapor.

Os sistemas ditos convencionais são na maioria das vezes sistemas rígidos e que possuem um número bem limitado de equipamentos e configurações de operação. Isso acontece, pois, os engenheiros tentam reduzir o valor do projeto para torna-lo mais viável economicamente, porém, muitas vezes não é levado em consideração que parâmetros econômicos importantes de operação possam sofrer alterações significativas. No caso de economias que apresentem instabilidade nas tarifas, os sistemas de cogeração podem ser financeiramente mais confiáveis ao longo do tempo.

Encontrar a configuração ideal de design e operação de sistemas de CCHP é um desafio devido as variações das tarifas energéticas e ambientais, flutuações das taxas de câmbio, elevado número de tecnologias disponíveis e tantos outros fatores que interferem direta ou indiretamente na escolha do sistema ideal (SÖDERMAN; PETTERSSON, 2006). O ideal seria a simulação de sistemas com várias possibilidades de equipamentos, dos mais simples aos mais complexos, além da variação simultânea de parâmetros relevantes, porém, quanto mais variáveis, mais difícil fica o problema de otimização e, geralmente, maior o tempo de otimização desses sistemas.

Nesse contexto, o grupo de pesquisa do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) tem realizado estudos em otimização de sistemas térmicos a mais de 10 anos. Os trabalhos desenvolvidos pelo grupo (Macêdo (2007); Guerra (2011); Oliveira (2011); Silva (2012); Hornsby (2014); Freitas (2016); Souza (2017)) utilizavam um método híbrido baseado na programação linear e busca exaustiva (BE/PL), método este, que apesar da qualidade, por trabalhar apenas com potências de equipamentos reais, realiza algumas estapas que deixam o processo de otimização lento. Essa dissertação vem contribuir com o grupo sugerindo um novo método híbrido baseado na programação linear inteira mista (BS/PL), que utiliza o MILP para reduzir o número de potências a serem permutadas, reduzindo o tempo de otimização e mantendo a qualidade de trabalhar apenas com equipamentos reais.

1.2 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é realizar a otimização de um sistema adaptativo através de um novo método híbrido baseado na programação linear inteira mista (BS/PL), de modo que o sistema atenda as demandas energéticas e gere o maior retorno financeiro.

1.3 Objetivos Específicos

- Mostrar de forma didática a construção do problema de otimização em uma linguagem orientada ao objeto com base no código utilizado por Hornsby (2014);
- Propor um novo método de otimização híbrido baseado no MILP;
- Realizar comparações entre os diversos métodos de otimização em relação ao valor do VPL obtido e o tempo de otimização necessário.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividia em 6 capítulos e uma bibliografia.

No capítulo 1, foram introduzidos alguns temas que motivaram a realização do trabalho, mostrado de forma breve, alguns tópicos importantes da dissertação, além de descrever os objetivos geral e específicos.

No capítulo 2 é feita a fundamentação teórica, onde são mostrados pontos de linguagem orientada ao objeto, análise financeira e programação linear.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica sobre temas importantes para o estudo, onde são mostrados diversos trabalhos relevantes que foram referência para a dissertação.

O capítulo 4 aborda alguns detalhes sobre o sistema térmico utilizado, além apresentar a modelagem matemática do sistema e o método de otimização utilizado.

Os estudos de caso são detalhados no capítulo 5, onde são mostrados os resultados do estudo da variação da tarifa energética com 3 métodos distintos.

As conclusões dos estudos de caso e sugestões para trabalhos futuros são mostradas no capítulo 6. Por fim, as referências bibliográficas são apresentadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo fornecer um embasamento teórico em conceitos físicos e computacionais que estão por detrás do novo método proposto. Inicialmente serão apresentados os conceitos de programação orientada a objetos, ferramentas econômicas utilizadas para indicar a viabilidade do projeto, e em seguida, a modelagem matemática de problemas de programação linear.

2.1 Análise Financeira

A viabilidade dos projetos de engenharia é analisada levando em consideração tanto aspectos técnicos quantos os aspectos financeiros. O mercado atual é caracterizado pela grande competitividade das empresas em relação a mostrar qual projeto tem o melhor retorno financeiro para o cliente. A escolha do melhor projeto é condição básica para uma boa gestão e exige a utilização de ferramentas de apoio à tomada de decisão. Estas ferramentas se baseiam nos retornos propiciados pelos fluxos de caixa relevantes associados aos projetos. Existem várias métricas que podem ajudar na tomada de decisão, como por exemplo, *Payback*, TIR e VPL.

Segundo Cadore (2012), o *payback* é representado pelo período de tempo que a empresa irá demorar para recuperar o capital investido, calculado a partir do fluxo de caixa. Esse indicador é usado quando se deseja calcular a taxa de atratividade de determinado investimento. De acordo com Motta e Calôba (2002) esse método não deve ser utilizado sozinho, pois deve ser visto com um indicador para a avaliação de projetos, e não como critério. Ao se analisar junto com outros indicadores, como TIR e VPL, poderá mostrar informações importantes em relação ao valor e tempo de retorno dos investimentos, pois quanto menor o tempo de retorno, maior as chances de o projeto ser viável.

A TIR é definida como a taxa de desconto de um investimento que torna seu valor presente líquido nulo, ou seja, que faz com que o projeto pague o investimento inicial quando considerado o valor do dinheiro no tempo. Esta é obtida por tentativa, ou seja, arbitram-se valores sucessivos até que se obtenha um valor tal que iguale os valores atuais das receitas e das despesas. (FREITAS, 2016)

O VPL é um método de análise financeira que tem como objetivo calcular o valor presente de uma sucessão de pagamentos futuros, deduzindo uma taxa de custo de capital. Esse cálculo é extremamente necessário, devido ao fato de que o dinheiro que receberemos no futuro não terá o mesmo valor que o dinheiro possui no tempo

presente.

Nesta dissertação, o VPL é a ferramenta utilizada para verificar qual o melhor caso possível em relação retorno financeiro. A Equação 2.1 é utilizada para o cálculo do VPL.

$$\text{VPL} = \text{VI} + \mu\text{VM}; \tag{2.1}$$

- VI - Custo inicial do projeto.
- VM - Custo mensal do projeto.
- μ - Fator de valor presente

O fator de valor presente μ é mostrado na Equação 2.2.

$$\mu = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{(1+i)^n} \tag{2.2}$$

- i - Taxa de juros.

Uma das vantagens desse método é que ele leva em conta o valor do capital no tempo e inclui todos os capitais do fluxo de caixa do projeto, sendo aplicável a qualquer tipo de fluxo de caixa (simples, convencionais e não convencionais). Caso seja necessário escolher entre dois ou mais projetos mutuamente excludentes, em princípio deve ser escolhido o de maior VPL, pois este é o que maximiza o aumento da riqueza em relação à situação sem projeto otimizado.

2.2 Programação Linear

A programação linear é uma das técnicas presentes na pesquisa operacional que se baseia em conceitos matemáticos para resolução de problemas. Os problemas de programação linear buscam a otimização de recursos para atender um objetivo, que em geral é maximizar os lucros ou minimizar custos. O objetivo é expresso através de uma função linear, que é conhecida como "Função Objetivo".

Para o modelo, também é necessário que se defina quais são as atividades que consomem recursos e em quais proporções esses recursos são consumidos. Essas informações são apresentadas em forma de equações ou inequações lineares. Essas equações são chamadas de restrições do modelo. A partir desses dados, a programação busca encontrar a solução ótima para o problema.

2.2.1 Modelo Matemático

A estrutura de um problema a ser resolvido por programação linear apresenta uma função objetivo e suas restrições. Segundo Maculan e Fampa (2006), a forma padrão de uma função objetivo é dada pela Equação 2.3, ou em sua notação de somatório, pela Equação 2.4.

$$y = c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_px_p \tag{2.3}$$

$$y = \sum_{j=1}^{p} c_jx_j \tag{2.4}$$

As restrições são representadas na sua forma geral pelas equações 2.5 e 2.6.

$$\sum_{j=1}^{p} a_{ij}x_j \leq b_i, \quad i = 1, 2, ..., q \tag{2.5}$$

$$0 \leq x_j \leq g_j, \quad j = 1, 2, ..., p \tag{2.6}$$

onde, c_j, a_{ij} e b_j são dados (números reais) e x_j representa para $j = 1, 2..., p$, as variáveis de decisão. As restrições de não negatividade da Equação 2.6 são conhecidas como triviais, o valor g limita o valor máximo de x_j. Os valores a e c são constantes que fazem as equações das restrições e a função objetivo se tornarem lineares. O termo b_i é caracterizado como condição de contorno.

2.2.2 Forma Matricial

Na utilização da técnica de programação linear para problemas práticos de maximização ou minimização, normalmente se representa o problema na forma matricial mostrada na Equação 2.7.

$$y = (\mathbf{f.x}) \rightarrow min \tag{2.7}$$

No presente trabalho, o termo **f** é uma matriz que representa os tarifas inciais e mensais dos equipamentos. Já a matriz **x** representa as linhas de potência do sistema. O produto escalar entre essas duas matrizes representa o VPL. A Equação 2.7 está sujeita as seguintes restrições:

$$\mathbf{A}_{eq}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}_{eq} \tag{2.8}$$

A matriz $\mathbf{A}_{eq}$ representa as equações de restrição e a matriz $\mathbf{b}_{eq}$ representa as demandas que o sistema deve suprir.

2.3 Programação Linear Inteira Mista

A programação linear inteira mista pode ser entendida como um caso especifico da programação linear, onde parte das variáveis são inteiras. Quando todas as variáveis devem possuir valores inteiros, o problema é de programação linear inteira pura, caso contrário, é denominado de um problema de programação linear inteira mista, que é o modelo utilizado nesse estudo.

A programação linear com números inteiros é interessante em diversas aplicações onde um valor não inteiro não tem um significado prático. Alguns exemplos de aplicação são mostrados a seguir:

1. Escolha de equipamentos: x_j representa a potência nominal de um equipamento. No caso de um valor $x_j = 321,12kW$, esse valor pode não representar uma potência comercial.
2. Utilização de equipamentos: x_j representa a quantidade de equipamentos. Por exemplo, $x_j = 2,33$ navios petroleiros podem não tem significado prático.
3. Tamanhos de Lotes: Em algumas situações de produção, faz-se necessário que $x_j = 0$ ou $x_j > L$, onde x_j representa a quantidade de produtos produzidos e L_j uma quantidade mínima de produtos x_j para compor o lote. Está situação é um exemplo de restrição "ou-ou"(ou faz o mínimo ou não faz nada).

Os problemas de programação inteira mista são geralmente mais difíceis de serem resolvidos quando comparados com problemas que trabalham com o conjunto solução contínuo. Para exemplificar, deseja-se otimizar a Equação 2.9.

$$max\,(21x_1 + 11x_2) \tag{2.9}$$

Submetida as restrições abaixo:

$$\begin{cases} 7x_1 + 4x_2 \leq 3 \\ x_1, x_2 \geq 0 \in Z \end{cases} \tag{2.10}$$

Quando resolvido utilizando a programação linear sem considerar a restrição de variáveis inteiras, a solução ótima encontrada foi $x_1 = 1,857$ e $x_2 = 0$.

Caso os resultados fossem arredondados, teríamos $x_1 = 2$ e $x_2 = 0$ que é inviável, pois viola uma das restrições. No caso de arredondar "para baixo", teríamos $x_1 = 1$ e $x_1 = 0$ que é viável, porém bem distante de ser a solução ótima. A regra de arredondar a solução não funciona bem nesse caso, pois não é um procedimento robusto para solucionar problemas de programação inteira.

Nessa dissertação foi utilizado o pacote GLPK (*GNU Linear Programming Kit*), que utiliza como base a técnica conhecida como "*Branch and Bound*", que é a abordagem mais amplamente adotada para resolver problemas de programação linear inteira mista.

Dado um problema de MILP, o algoritmo utiliza a filosofia de dividir para conquistar, isto é, retira-se a condição complicante de integralidade do problema de MILP e resolve inicialmente um problema de PL e a partir desta solução, inicia-se um processo de busca da solução do problema MILP original.

Delgado e Rider (2014) descrevem que o termo "*Branch*", expressa a seleção de uma variável inteira com um valor atual não inteiro para a criação de dois novos subproblemas de PL, essa tática divide a região de busca em sub-regiões e permite o descarte de regiões onde não existe solução inteira para o problema inicial.

O termo "*Bound*" expressa critérios estabelecidos para eliminar os subproblemas ainda não investigados, pois se resolvidos, não iriam contribuir para melhorar a solução atual. O processo termina quando não há mais subproblemas para investigar.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados diversos trabalhos relacionados a sistemas térmicos, ferramentas de otimização, critérios de escolha e análises financeiras relacionadas a processos de cogeração. O objetivo deste capítulo é contextualizar o trabalho desenvolvido com os recentes estudos na área de sistemas térmicos.

3.1 CCHP e MILP

Hornsby (2014) utilizou um método de otimização híbrido para avaliar a robustez sistemas térmicos adaptativos. Foram analisadas as métricas financeira e ambiental. Foram utilizados na análise dois locais diferentes, com diferentes demandas e emissões de CO_2, que foram Recife e Boston.

Freitas, Magnani e Hornsby (2017) também realizaram um estudo para avaliar a robustez do sistema em relação a variações de parâmetros como tarifa de combustível, tarifa de energia elétrica, cambio, e variação da demanda no horário de ponta.

Guerra (2011) utilizou um método híbrido para minimizar o VPL de um sistema de cogeração. O sistema de cogeração proposto tinha como objetivo suprir as demandas de eletricidade, vapor e água gelada de um prédio comercial localizado no Recife.

Liu, Shi e Fang (2014) realizaram uma análise sobre o estado da arte dos sistemas CCHP, onde são discutidos diversos aspectos e feitas diversas comparações entre os equipamentos e modelos pesquisados atualmente. No estudo, foram feitas comparações entre os motores primários, que são equipamentos que transformam energia térmica, elétrica ou de pressão em energia mecânica. A Tabela 1 mostra as principais características desses equipamentos, como faixa de potência, vantagens, desvantagens, principais poluentes emitidos e preferencias de aplicação.

Em outra parte do estudo de Liu, Shi e Fang (2014), são feitas comparações entre as principais tecnologias ativadas termicamente para geração de carga térmica de baixa temperatura. A Tabela 2 mostra as principais características desses equipamentos. Esse trabalho de levantamento das características dos equipamentos é importante na fase de pré-seleção, pois pode reduzir o tempo de levantamento de dados com a exclusão de equipamentos pela faixa de potência ou por não ter características específicas necessárias para o projeto.

As várias estratégias de funcionamento de um motogerador em um sistema CCHP foram estudadas por Wang e Yang (2017). A comparação é feita entre 3 tipos de

Tabela 1 – Características dos motores primários

Prime mover	Size (kW)	Pros.	Cons.	Emissions	Preferences and applications
IC engine	10–5000	• Low capital cost • Quick start • Good load following • High partial efficiency • High reliability	• Regular maintenance required	• High NO_x using diesel • Natural gas preferred	• Working with absorption/electric chiller • Small- to medium-scale
Combustion turbine	500–250,000	• High quality exhaust heat	• Unacceptable low partial efficiency • Long start-up	• NO_x 25 ppm • CO 10–50 ppm	• Applications with huge amount of thermal need Large-scale
Steam turbine	50–500,000	• Flexible fuel	• Low electric efficiency	• Depends on fuel	• Electricity as by-product, thermal need preferred • Large-scale
Micro-turbine	1–1000	• Flexible fuel • High rotation speed • Compact size • Less moving parts • Lower noise	• High capital cost • Low electric efficiency • Efficiency sensitive to ambient conditions	• NO_x < 10 ppm	• Distributed energy system • Micro- to small-scale
Stirling engine	Up to 100	• More safe and silent • Flexible fuel • Long service time • Can be solar driven	• High capital cost • Power output hard to tune	• Less than IC engine	• Solar driven • Small-scale
Fuel cell	0.5–1200	• Operate quietly • Higher reliability than IC and combustion engine • High efficiency	• Energy consumption and GHG emissions due to hydrogen producing	• Extremely low	• Micro- to medium-scale

Fonte: Liu et al(2004)

Tabela 2 – Características dos equipamentos ativados termicamente

Thermally activated technology	Size (chilling power)	Pros.	Cons.	COP	Preference
Absorption chiller	10 kW–1 MW	• Driven by steam • Low noise • Can be driven by low quality heat source • Low GHG emission	• Less efficient than compressor-drive chiller	Up to 1.2	• LiBr/water: evaporation temperature 5–10 °C • NH_3/water: evaporation temperature < 0 °C • Small- to Large-scale • Double-effect preferred
Adsorption chiller	5.5–500 kW	• Driven by steam • Small size • Noise free • Corrosion and crystallization trouble free • No lubrication • Low GHG emissions	• Can only be driven by high quality heat • High capital cost	0.6	• Small-scale
Desiccant dehumidifier	N/A	• Control of humidity independent of the temperature is allowed • Reduce the mechanical cooling load	• High capital cost • Regular maintenance required	N/A	• Solid: HVAC systems • Liquid: industrial and residential applications

Fonte: (LIU; SHI; FANG, 2014)

estratégia de operação, que são descritas abaixo:

- FEL (*following electric load*) - A energia elétrica produzida pelo motogerador acompanha a demanda elétrica do sistema.
- FTL (*following thermal load*) - A energia térmica útil produzida pelo motogerador acompanha a carga térmica.
- HET (*hybrid electric-thermal*) - Estratégia hibrida que combina FEL e FTL.

Wang e Yang (2017) desenvolveram equações de carga térmica e elétrica baseadas em conceitos de termodinâmica. Ao aplicar essas equações em um estudo de caso, foi verificado que o sistema operado com a estratégia de HET teve a menor emissão de carbono, obtendo uma redução de mais de 50% em relação a estratégia FTL. O sistema HET também conseguiu obter a melhor eficiência energética, como mostrado na Tabela 3. Esse estudo mostra a importância da otimização operacional do sistema, visto que o sistema mantem a mesma estrutura física e obtem resultados diferentes para estratégias de operação diferentes.

Tabela 3 – Comparativo entre as estratégias FEL, FTL e HET

Summer	*PEC* kW·h/Day	*CDE* kgCO2/Day	*OC* Yuan/Day	*EE* %	Comfort Reliability %	Surplus Product kW·h/Day	
HET	6822.40	1186.23	1944.65	51.75	100	T: 809	
FEL	6941.22	1206.89	1954.75	50.86	100	T:1287	
FTL	16804.12	2921.78	4755.64	21.02	100	T: 4183	E:3685

Fonte: (WANG; YANG, 2017)

Smith e Mago (2014) analisaram os efeitos das estratégias (FEL,FTL e HET) de operação em um sistema CHP de um hotel. O estudo mostrou que o sistema hibrido atingiu resultados superiores em relação a outras estratégias, obtendo valores de eficiência entre 71% e 87%. Além disso, foram testados dois métodos de dimensionamento dos equipamentos, um baseado no consumo horário e outro baseado no consumo mensal. O sistema dimensionado a partir do consumo horário conseguiu um desempenho em média 4,5% superior ao sistema baseado no consumo mensal. A eficiência obtida em um sistema que adotou a estratégia hibrida e o dimensionamento a partir do consumo mensal foi superior as estratégias FEL e FTL aplicadas no consumo horário.

Henning, Amiri e Holmgren (2006) aplicaram a técnica de otimização MODEST(*Model for Optimisation of Dynamic Energy Systems with Time dependent components and boundary conditions*), que usa como base a programação linear, para analisar o impacto da implementação de limites de emissão de CO_2 em um sistema CHP localizado na cidade de sueca de Linkoping. O sistema energético inclui diversos tipos de combustíveis e ocorre a geração interconectada de vários tipos de energia. A Figura 2 mostra como é dividida a matriz de combustíveis da cidade a partir de uma análise com o MODEST.

Com a aplicação dos limites de CO_2, o total de energia vendida sofreu modificações para poder satisfazer tanto a parte financeira quanto a ambiental com o menor custo possível. A aplicação desses limites no mercado local elevou em 10% o custo total. Isso ocorreu devido ao aumento do suprimento externo de eletricidade da rede, que no contexto do estudo é considerado "livre de CO_2". As Tabelas 4 e 5 mostram

Figura 2 – Utilização ótima de combustível para o distrito sem o limite de CO_2

Energy supply without CO_2 limit

Energy carrier	GWh/year
Waste	670
Wood	440
Oil	230
Coal	160
Rubber	130
Plastics	84
Animal fat	140
External electricity for boilers	1

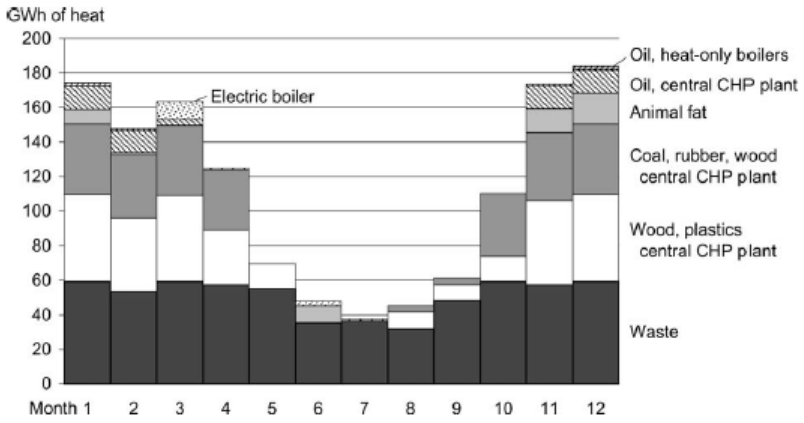


Fig. 7. Optimal fuel use for district heating production without CO_2 limit.

Fonte: (HENNING; AMIRI; HOLMGREN, 2006)

os impactos na geração de energia. Em resumo, esse estudo mostra o impacto da implementação de legislações que limitem a emissão de CO_2 na cadeia de produção energética da cidade, evidenciando quem em cidades onde existe uma legislação limitante rígida, a emissão de CO_2 precisa ser levada em consideração durante a escolha de projetos.

Tabela 4 – Produção anual de eletricidade e emissão de CO_2

CO_2 limit	Without	Local	Marginal coal
Electricity production (GWh)	650	540	1020
CO_2 emissions (kton)			
Local	206	154[a]	360
Including coal-condensing plants	676	760	507[a]

[a] Limited to 75% of the emissions in the first case.

Fonte: (HENNING; AMIRI; HOLMGREN, 2006)

Vögelin et al. (2017) introduziram um novo método de otimização em uma planta de CHP como substituto para a abordagem do estado da arte baseada no MILP para determinar qual a configuração mais rentável. A aplicação do HECHAPPO (*Heuristic Combined Heat and Power Plant Optimizer*) se mostrou uma alternativa mais rápida

Tabela 5 – Fluxo externo de energia elétrica no sistema CHP da cidade de Linkoping

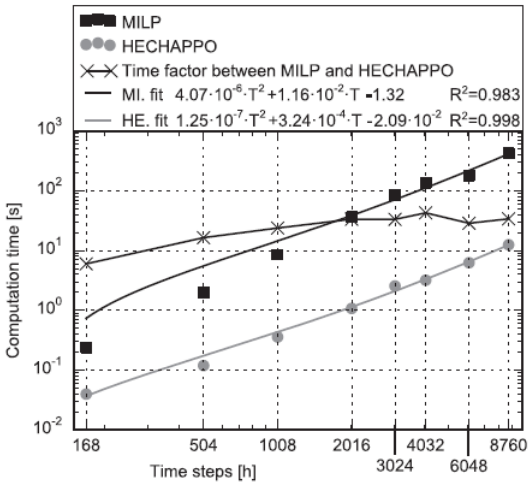
External electricity flows (GWh/year)			
CO_2 limit	Without	Local	Marginal coal
Supply	1140	1150	650
Sales	570	420	470
Net supply	570	730	180

Fonte: (HENNING; AMIRI; HOLMGREN, 2006)

que o MILP.

Ao se analisar o período de 1 ano (8760h), o HECHAPPO resolveu o problema 34 vezes mais rápido que o MILP. Os resultados da análise são mostrados na Figura 3 e Tabela 6, onde o fator de tempo é dado pela divisão entre o tempo de otimização do MILP pelo tempo de otimização do HECHAPPO.

Figura 3 – Perfomance dos algoritmos para diversas etapas de tempo, variando de 1 semana a 1 ano



Fonte: (VÖGELIN et al., 2017)

Tabela 6 – Tempo computacional dos algoritmos para diferentes etapas de tempo, variando de 1 semana a 1 ano

T	168	504	1008	2016	3024	4032	6048	8760
MILP	0.240	1.97	8.56	36.1	85.0	136	179	423
HECHAPPO	0.0340	0.120	0.360	1.08	2.56	3.20	6.26	12.5
Time factor	6.00	16.4	23.8	33.4	33.2	42.6	28.6	33.9

Fonte:(VÖGELIN et al., 2017)

Do ponto de vista de eficiência dos equipamentos utilizados em sistemas CCHP, Bischi et al. (2014) fizeram uma pesquisa interessante sobre a otimização com o MILP de um sistema CCHP. Diferentemente do modelo utilizado nessa dissertação,

que considera os valores de eficiência constantes, o modelo estudado por Bischi et al. (2014) utiliza curvas de performance para os equipamentos obtidas através de pequisa na literatura, simulação em software dedicado e informações fornecidas pelos fabricantes. As curvas normalizadas são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Curvas normalizadas para turbina à gás (GT), motor de combustão interna (ICE), bomba de calor (HP) e para caldeiras auxiliares (AB)

Normalized performance curves of the units considered for all the Test Cases.

Unit type	Operative variables	Performance curves
GT	f_{GT}	*Third-degree polynomial (smooth curve)* Range: from 45% (minimum load) to 100% of the electric power output $q_{high,GT} = 1.5025 - 0.0227 \cdot T_0 - 4.2896 \cdot f_{GT} + 0.0001 \cdot T_0^2 + 0.0532 \cdot f_{GT} \cdot T_0 + 6.3670 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 - 0.0002 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} - 0.0327 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 2.5298 \cdot f_{GT}^3$ $q_{low,GT} = 4.4146 - 0.0469 \cdot T_0 - 12.3183 \cdot f_{GT} + 0.0000 \cdot T_0^2 + 0.0931 \cdot f_{GT} \cdot T_0 + 13.0429 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 + 0.0000 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} - 0.0462 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 4.1268 \cdot f_{GT}^3$ $el_{,GT} = 2.5748 - 0.0358 \cdot T_0 - 8.6217 \cdot f_{GT} + 0.0001 \cdot T_0^2 + 0.0833 \cdot f_{GT} \cdot T_0 + 10.8790 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 - 0.0002 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} - 0.0465 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 3.8297 \cdot f_{GT}^3$ *Two-piece quadratic fit (non-smooth curve)* Range 1: from 45% (minimum load) to 65% of the electric power output $q_{high,GT} = 2.6813 - 0.0449 \cdot T_0 - 10.3036 \cdot f_{GT} + 0.0003 \cdot T_0^2 + 0.1253 \cdot f_{GT} \cdot T_0 + 16.2263 \cdot f_{GT}^2 - 0.0000 \cdot T_0^3 - 0.0005 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} - 0.0896 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 7.7592 \cdot f_{GT}^3$ $q_{low,GT} = 0.1534 + 0.0057 \cdot T_0 + 2.6460 \cdot f_{GT} - 0.0001 \cdot T_0^2 - 0.0282 \cdot f_{GT} \cdot T_0 - 3.7139 \cdot f_{GT}^2 - 0.0000 \cdot T_0^3 + 0.0001 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} + 0.0201 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 + 1.7472 \cdot f_{GT}^3$ $el_{,GT} = 3.7174 - 0.0638 \cdot T_0 - 15.6651 \cdot f_{GT} + 0.0004 \cdot T_0^2 + 0.1814 \cdot f_{GT} \cdot T_0 + 23.8038 \cdot f_{GT}^2 - 0.0000 \cdot T_0^3 - 0.0007 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} - 0.1283 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 11.2134 \cdot f_{GT}^3$ Range 2: from 65% to 100% of the electric power output $q_{high,GT} = -21.3667 + 0.3028 \cdot T_0 + 66.0182 \cdot f_{GT} - 0.0011 \cdot T_0^2 - 0.6193 \cdot f_{GT} \cdot T_0 - 65.4818 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 + 0.0011 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} + 0.3137 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 + 21.8797 \cdot f_{GT}^3$ $q_{low,GT} = -24.2273 + 0.3418 \cdot T_0 + 73.9794 \cdot f_{GT} - 0.0013 \cdot T_0^2 - 0.6961 \cdot f_{GT} \cdot T_0 - 73.3136 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 + 0.0013 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} + 0.3532 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 + 24.5818 \cdot f_{GT}^3$ $el_{,GT} = -26.5692 + 0.3685 \cdot T_0 + 79.8152 \cdot f_{GT} - 0.0013 \cdot T_0^2 - 0.7428 \cdot f_{GT} \cdot T_0 - 78.2867 \cdot f_{GT}^2 + 0.0000 \cdot T_0^3 + 0.0013 \cdot T_0^2 \cdot f_{GT} + 0.3742 \cdot T_0 \cdot f_{GT}^2 - 26.0477 \cdot f_{GT}^3$
ICE	f_{ICE}	Range: from 50%(minimum load) to 100% of the electric power output $q_{high,ICE} = 0.1390 + 0.0000 \cdot T_0 + 0.7192 \cdot f_{ICE} + 0.0000 \cdot T_0^2 + 0.0000 \cdot f_{ICE} \cdot T_0 + 0.1418 \cdot f_{ICE}^2$ $q_{low,ICE} = 0.1390 + 0.0000 \cdot T_0 + 0.7192 \cdot f_{ICE} + 0.0000 \cdot T_0^2 + 0.0000 \cdot f_{ICE} \cdot T_0 + 0.1418 \cdot f_{ICE}^2$ $el_{,ICE} = -0.1259 + 0.0029 \cdot T_0 + 1.1371 \cdot f_{ICE} - 0.0001 \cdot T_0^2 - 0.0011 \cdot f_{ICE} \cdot T_0 v0.0194 \cdot f_{ICE}^2$
HP	$el_{HP,comp}$	Range: from 12.5%(minimum load) to 100% of the thermal power $q_{low,HP,comp} = -0.0219 + 0.0056 \cdot T_0 + 0.3632 \cdot el_{HP,comp} + 0.0003 \cdot T_0^2 + 0.0436 \cdot el_{HP,comp} \cdot T_0 + 1.5057 \cdot el_{HP,comp}^2 - 0.0000 \cdot T_0^3 - 0.0001 \cdot T_0^2 \cdot el_{HP,comp} - 0.0088 \cdot T_0 \cdot el_{HP,\,comp}^2 - 1.2770 \cdot el_{HP,\,comp}^3$
AB,HT	$f_{AB,HT}$	Range: from 0% to 100% of the thermal power $q_{high,AB} = -0.0245 + 1.1378 \cdot f_{AB,HT} - 0.1150 \cdot f_{AB,HT}^2$
AB,LT	$f_{AB,LT}$	Range: from 0% to 100% of the thermal power $q_{low,AB} = -0.0245 + 1.1378 \cdot f_{AB,LT} - 0.1150 \cdot f_{AB,LT}^2$

Fonte:(BISCHI et al., 2014)

As curvas são linearizadas por partes e aplicadas em 4 estudos, onde verificou-se que para um número maior de intervalos, maior foi a acuracidade da aproximação pelo método. O resultado de um dos estudos é mostrado na Figura 4, onde verifica-se que com o aumento do número de intervalos, foram encontrados valores mais otimizados para a função objetivo.

Um ponto importante do estudo de Bischi et al. (2014) é que o modelo adotado no estudo, que utiliza o método de aproximação linear, pode lidar com curvas de performance com 2 a 3 graus de liberdade, além de poder tratar pontos de descontinuidade de função.

Zhang, Cho e Knizley (2016) fazem uma análise sobre as diversas políticas de incentivo aplicadas nos estados americanos para os sistemas de CHP que utilizam a estratégia FEL, no qual toda a energia elétrica é fornecida pelo sistema. A Tabela 8 mostra os diversos tipos de incentivo aplicados.

A Tabela 9 mostra as cargas elétricas e térmicas anuais das construções de

Figura 4 – Resultado da otimização por partes em aproximações lineares com 5,10 e 20 intervalos

Table 4
Main MILP model features for Test Case A and optimization results for piecewise linear approximations with 5, 10 and 20 intervals.

	5 intervals	10 intervals	20 intervals
Number of binary variables	408	768	1488
Total number of variables	1392	2112	3552
Number of constraints	1371	1731	2451
Computational time (s)	0.108	0.120	0.328
Relative MILP gap[a] (%)	4E−5	9E−3	2.7E−3
Objective function value (€)	15346.26	15337.51	15334.12

Fonte: (BISCHI et al., 2014)

Tabela 8 – Politicas de incentivo para os diversos estados americanos

City	Incentive policy
Phoenix, AZ	*Rebate*: obtain funding ranging from $400/kW to $500/kW and up to a maximum of 50% of the installed cost of any project
San Francisco, CA	*Rebate*: Obtain funding up to $95,000 for hardware projects *Grant* for Internal Combustion Engine (CHP): $0.46/W
Hartford, CT	A capital *grant* of $200/kW
Chicago, IL	Design Incentive *Grant* of $75/kW Constructive Incentive *Grant* of $175/kW capacity Production Incentive *Grant* of $0.08/kW h
Boston, MA (1)	The maximum *grant* available is $200,000
Boston, MA (2)	*Grant* of $750/kW, not to exceed 50% of total project costs
Atlantic City, NJ	*Grant* for CHP systems greater than 1.0 MW and up to 3.0 MW: $0.55/W
Albuquerque, NM	*Rebate*: Custom rebates are worth up to $400/kW saved and efficiency studies for large commercial and industrial customers can cover up to 75% of the study cost
Kennedy, NY	*Grant* for designs 3–9% above designated baseline: $0.11/kW h saved, capped at 75% for CHP system cost
Houston, TX	*Grant* incentives to offset 20% of the upfront implementation costs
Baltimore, MD	Payment of $250/kW of net system capacity payment Production payment of $0.07/kW h for net electricity produced during the 18 months, capped at $2,000,000 per project and 50% of total cost
Madison, WI	Incentive *grants* for installing recommended energy efficiency improvements: $0.1/kW h savings; $300/kW savings. The maximum incentive is $40,000 or 20% of project costs

Fonte: (ZHANG; CHO; KNIZLEY, 2016)

referência nas diferentes localidades. A Tabela 10 mostra a redução de despesas com os incentivos aplicados pelo governo em um hospital. A Figura 5 mostra a redução no tempo de payback de um sistema CHP para cada localidade com a aplicação de política de incentivo.

Tabela 9 – Carga elétrica e térmica anual para diferentes construções de referência

City	Hospital		Large office		Large hotel		Secondary school	
	Electric load	Thermal load	Electric load	Thermal load	Electric load	Thermal load	Electric load	Thermal load
Phoenix, AZ	6926	1424	6168	236	2091	1118	3101	343
San Francisco, CA	6162	1620	5262	367	1807	1571	2110	590
Hartford, CT	6313	1951	5365	745	1813	2128	2249	1363
Chicago, IL	6423	2322	5455	984	1857	2296	2339	1596
Boston, MA	6302	1942	5329	795	1834	2197	2235	1508
Atlantic City, NJ	6553	1935	5499	595	1877	2099	2340	1184
Albuquerque, NM	6182	1284	5356	294	1856	1783	2354	799
Kennedy, NY	6547	1820	5500	597	1884	2079	2365	1194
Houston, TX	7551	1831	6544	253	2159	1251	3175	374
Baltimore, MD	6718	1823	5820	586	1913	1922	2477	1139
Madison, WI	6269	2536	5375	1302	1839	2482	2291	1973

Fonte: (ZHANG; CHO; KNIZLEY, 2016)

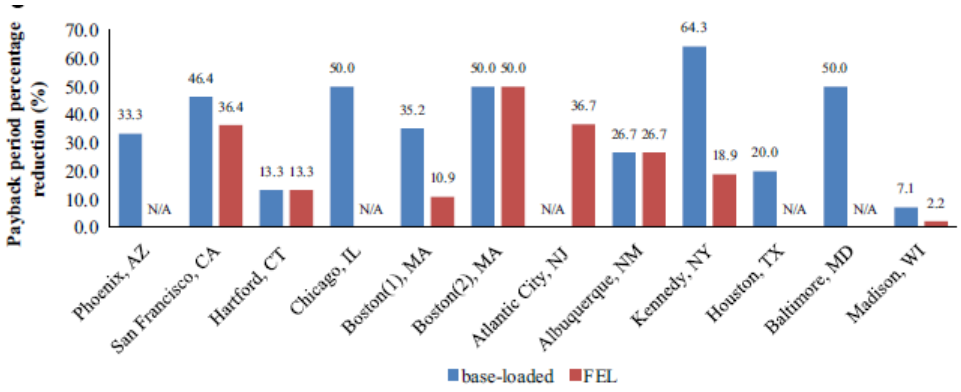
Wu et al. (2014) realizaram um estudo sobre a influência dos tipos de construção

Tabela 10 – Sumário da análise de incentivo para um hospital de referência

City	Saving ($)	Payback period without incentive (year)	Payback period with incentive (year)	Percentage reduction (%)
Phoenix, AZ	39,780	15.6	10.4	33.3
San Francisco, CA	260,500	2.3	1.2	46.4
Hartford, CT	257,200	2.2	1.9	13.3
Chicago, IL	70,950	7.9	4.0	50
Boston, MA (1)	170,100	3.3	2.2	35.2
Boston, MA (2)	170,100	3.3	1.7	50
Atlantic City, NJ	201,900	2.9	N/A	N/A
Albuquerque, NM	120,400	4.8	3.5	26.7
Kennedy, NY	282,600	2.0	0.7	64.3
Houston, TX	33,490	19.8	15.8	20
Baltimore, MD	74,590	7.8	3.9	50
Madison, WI	174,100	3.3	3.0	7.1

Fonte: (ZHANG; CHO; KNIZLEY, 2016)

Figura 5 – Redução no tempo de payback de um sistema CHP com a aplicação de incentivos econômicos em um hospital



Fonte: (ZHANG; CHO; KNIZLEY, 2016)

e de condições climáticas na instalação de um sistema CCHP, analisando 4 categorias representativas importantes (hotel, hospital, armazém e escritório) localizados em diversas áreas do Japão. A partir de uma análise que levou em consideração aspectos energéticos, econômicos e ambientais, verificou-se que nas categorias hotel e hospital, os sistemas CCHP obtiveram uma performance geral superior aos armazéns e escritórios.

Yang, Zhang e Xiao (2015) realizaram um estudo focado no design ótimo de um sistema CHP onde a energia é produzida próxima das construções consumidoras, adotando a estratégia DER (*distributed energy resources*). O MILP foi utilizado para otimizar simultaneamente localidade, tipo, capacidade e número de equipamentos necessários para o projeto. O custo anual total com o sistema DER apresentou uma redução de 14% em relação a um sistema padrão centralizado.

Ren e Gao (2010) realizaram um estudo de otimização em um sistema DER, que são sistemas conectados a rede localizados próximos ou no local do consumidor final.

O estudo numérico foi aplicado no eco-campus de Kitakyushu no Japão, onde foram analisadas 8760h de funcionamento do sistema, considerando cargas energéticas diferentes no inverno e no verão, variando as tarifas energética e de combustível. Os seguintes cenários foram avaliados:

1. Sistema Convencional - Energia elétrica da rede e vapor da caldeira a gás
2. DER sem CCHP
3. DER + CCHP
4. DER + CCHP + Armazenamento de energia

A partir dos dados, verificou-se na análise econômica, que os cenários 2, 3 e 4 apresentaram reduções de 9,6%, 13,4% e 13,4% respectivamente em relação ao cenário 1. A introdução de um equipamento para o armazenamento de calor no cenário 4 não influenciou no custo do sistema, pois a demanda térmica foi muito baixa no período.

Souza (2017) avaliou o impacto do crédito de carbono na escolha de sistemas térmicos mais limpos. O estudo realizou diversas análises variando o preço do crédito de carbono, onde verificou-se que para os dados utilizados, tarifas de crédito de carbono até US$32 não são capazes de direcionar a otimização para sistemas mais limpos. A partir de US$32, foram observadas mudanças na configuração do sistema, juntamente com o aumento da receita e a queda na emissão de poluentes. O aumento da receita e a queda na emissão se observa até que o valor chegar em US$128. A partir deste valor, por mais que se aumente o valor do crédito de carbono, o sistema não apresenta uma alteração na configuração ótima, sendo observada a mesma taxa de emissão de CO_2 mesmo com a tarifa sendo US$320.

Fazlollahi e Maréchal (2013) exploraram as as técnicas de otimização multi-objetivas para investigar o dimensionamento e os efeitos operacionais de uma tecnologia de geração de energia nas emissões de CO_2. O conjunto principal de variáveis de decisão inclui o tipo e a potência máxima disponível de equipamentos. A otimização principal é resolvida utilizando o método EMOO (*multi-objective evolutionary algorithm*). Os resultados mostraram que a produção simultânea de eletricidade e calor com biomassa e gás natural é confiável sobre os pressupostos estabelecidos. Além disso, as maiores economias de energia primária e a redução das emissões de CO_2 (40%) são obtidas através do aumento gradual de fontes de energia renováveis em oposição ao uso de gás natural. No entanto, uma maior rentabilidade econômica, 52%, é alcançada com tecnologias baseadas em gás natural.

Tabela 11 – Resultados das duas opções

Method	Motors	Turbines
Present worth	6,299,323	2,080,519
Future worth	11,281,129	3,725,892
Annual worth	855,876	282,675
Capitalised worth	377,959	124,831
Internal rate of return	21.5%	14.6%
External rate of return	12.7%	6.15%
Growth rate of return (year 6)	17.4%	12.7%
Premium worth percentage	84.8%	44.8%
Return on original investment	25.1%	19.7%
Return on average investment	45.6%	35.7%
Benefit/cost ratio (Conventional)	1.84	1.44
Benefit/cost ratio (Lorie–Savage)	0.84	0.44
Profit to investment ratio	1.51	0.96
Payback period (years)	3.98	5.08
Project balance (year 3)	−2,904,951	−2,623,775

Fonte: (BIEZMA; CRISTOBAL, 2006)

Biezma e Cristobal (2006) realizaram um estudo que detalha a utilização e as limitações das diferentes técnicas de avaliação de projetos e mostra quando esses métodos são conectados e aplicados a sistemas de cogeração. A Tabela 12 mostra os diferentes critérios de avaliação de projetos com suas respectivas aplicações, expressões e limitações.

Foram propostas duas opções de sistema CHP para uma fábrica, a primeira com uma instalação de 14 MWe baseados em 4 motores a gás, e na segunda, a instalação de 7MWe constituída apenas por uma turbina à gás. A Tabela 11 mostra os resultados de diversas análises desses 2 sistemas.

Tabela 12 – Críterios de investimento, expressões, usos e limitações

Name	Expression		Applicable	Limitation
Present worth	$PW = -I + \sum_{j=1}^{n} \frac{Q}{(1+k)^j} + \frac{S}{(1+k)^n}$	(1)	It revolves the cash flows of a project to one equivalent present data	One disadvantage of these methods is that they ignore the size of the project and the repeated project assumption which assumes that the cost of the project, if repeated, remains constant throughout the analysis period
Future worth	$FW = PW(1+k)^n$	(2)	It revolves the cash flows to one equivalent cash flow at a future date	
Annual worth	$AW = \frac{PW}{\frac{1-(1+k)^{-n}}{k}}$	(3)	It converts all cash flows to a series of usually equal, cash flows	
Capitalized worth	$CW = PW * k$	(4)	It is the annual worth evaluated over an infinite time period	
Internal rate of return	$-I + \sum_{j=1}^{n} \frac{Q}{(1+i)^j} + \frac{S}{(1+i)^n} = 0$	(5)	It calculates the interest rate (i) for which the PW of a project equals zero	The ERR often calculates a more realistic rate of return than IRR. This method answer the question of how far must this investment grow in order to equal the second cash flow. In some cases an incremental analysis is necessary (15) PW must be positive
External rate of return	$e = \sqrt[n]{\frac{FW\ income}{I}} - 1$	(6)	The ERR method calculates the interest rate (e) for which the FW of the initial project investment equals the FW of all other cash flows invested at the MARR	
Growth rate of return	$g = \sqrt[x]{\frac{PW\ Cash\ Flows\ at\ year\ x}{I}} - 1$	(7)	This method determines a project's rate of return (g) at any instance during the project's life	
Premium worth percentage	$PWP = \frac{PW}{I}$	(8)	This method determines the "net profit" percentage by dividing the PW of the net profit by the investment	
Return on original investment	$ROI = \frac{AYP}{I}$	(9)	which measures a percentage relationship between the average yearly profit (AYP) and the investment	PW must be positive
Return on average investment	$RAI = \frac{AYP}{AYI}$	(10)	which measures the percentage relationship between the average yearly profit and the average yearly investment (AYI)	Depreciation must be introduced
Benefit/cost ratio (Conventional)	$\frac{B}{C} = \frac{PW\ benefits - PW\ disbenefits}{I - PW(S)}$	(11)	A project is accepted if B/C is higher than 1.0	PW benefits must be higher than PW of disbenefits
Benefit/cost ratio (Lorie-Savage)	$\frac{B}{C} = \frac{PW\ benefits - PW\ disbenefits - I}{I - PW(S)}$	(12)	A project is accepted if B/C is higher than 0.0	PW benefits must be higher than PW of disbenefits
Profit to investment ratio	$PIR = \frac{Profit - I}{I}$	(13)	It measures the profitability of a project by examining the relationship between the total undiscounted profit (P) and the investment	The profit must be higher than the investment
Payback period	$PP = \frac{I}{Q}$	(14)	It examines the number of years required for a project's earnings to equal the investment	PW must be positive
Project balance	See Remer and Nieto [24]		It allows the investor to determine the amount of positive or negative total receipts at the end of each time period	

Fonte: (BIEZMA; CRISTOBAL, 2006)

4 MODELAGEM E DADOS

A modelagem abordada neste trabalho se baseou no estudo de Hornsby (2014), que utilizava um método híbrido que combinava a programação linear com a busca exaustiva para solucionar problemas de otimização energética. A partir dessa base, foram realizadas modificações no código e adicionadas diversas estruturas de programação linear inteira mista, com foco no aumento da velocidade de otimização. A nova modelagem matemática baseada no MILP será detalhada nesse capítulo.

Para fornecer um embasamento sobre o funcionamento do programa em C++, inicialmente serão mostrados de forma didática diversos aspectos importantes sobre do sistema, como as caraterísticas presentes nos blocos e como as ligações entre esses blocos são feitas. Os números utilizados para rotular as linhas de energia são ilustrativos e servirão para que a modelagem matemática possa ser desenvolvida.

Nesse capítulo também serão abordados os dados técnicos e financeiros que foram levantados a partir de fontes confiáveis e recentes, com o intuito de que cálculo do VPL fosse o mais realista possível.

4.1 Modelagem Física

O sistema de cogeração utilizado no estudo é o mostrado na Figura 6. O sistema utiliza duas fontes de energia: o gás natural da linha de combustível (FL) e a eletricidade fornecida pela rede elétrica (EG). A partir dessas fontes de energia, o sistema é capaz de gerar vapor (S), água gelada (W) e eletricidade (E). Os números em cinza mostrados na Figura 6 identificam os fluxos energéticos que entram e saem dos equipamentos.

A demanda de vapor (S) é suprida por uma caldeira elétrica (EB), pela caldeira de recuperação (RB) e/ou pela caldeira a gás (GB). A caldeira elétrica utiliza um sistema de resistências elétricas para aquecer água e gerar vapor. A caldeira de recuperação utiliza a energia dos gases quentes residuais da queima de combustível no motogerador (PG) para gerar o vapor. A caldeira a gás (GB) faz uso da linha de combustível para realizar a queima do gás, gerando o calor necessário para o aquecimento da água e a geração vapor.

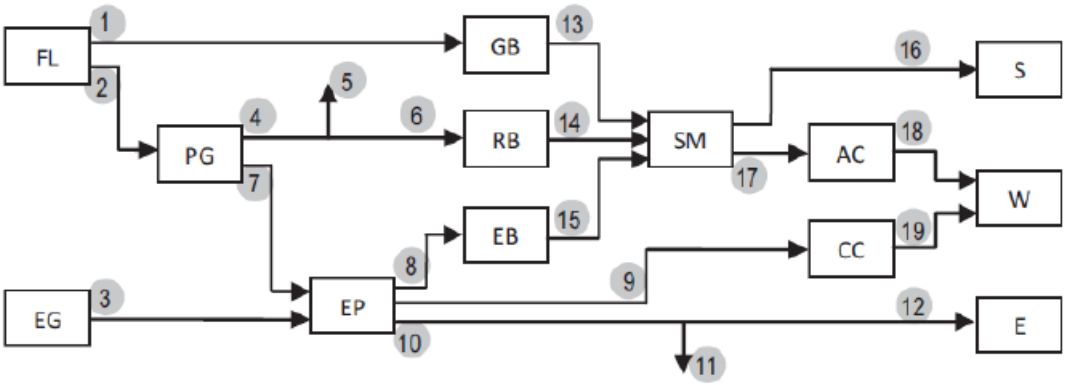
A demanda de água gelada (W) pode ser suprida por dois equipamentos, o *chiller* de absorção (AC) e o *chiller* de compressão (CC). O *chiller* de compressão utiliza a energia elétrica da rede (EG) e/ou a gerada pelo motogerador (PG). O *chiller* de absorção utiliza a energia do vapor gerado pela caldeiras para o seu acionamento.

Para suprir a demanda elétrica o sistema pode utilizar a rede e/ou fazer uso do

motogerador.

Nesta dissertação as linhas de fluxo energético serão representadas por x_i (i é o índice correspondente aos números das linhas de fluxo encontrados na Figura 6).

Figura 6 – Modelo da planta simulada em C++



Fonte: (HORNSBY, 2014)

- FL(*Fuel Line*) : Linha de combustível
- EG(*Electrical Grid*) : Rede pública de distribuição elétrica
- PG(*Power Generator*) : Grupo moto gerador
- EP(*Electrical Energy Panel*) : Painel elétrico
- GB(*Gas Boiler*): Caldeira a gás
- RB(*Recovery Boiler*) : Caldeira de recuperação
- EB(*Electrical Boiler*) : Cadeira elétrica
- SM(*Steam Manifold*) : Distribuidor de vapor
- AC(*Absorcion Chiller*) : Chiller de absorção
- CC(*Compression Chiller*) : Chiller de compressão;
- S(*Steam demand*) : Demanda de vapor
- W(*Chilled Water Demand*) : Demanda de água gelada
- E(*Electricity Demand*) : Demanda elétrica.

4.1.1 Equipamentos

O sistema genérico a ser estudado é basicamente composto dos seguintes equipamentos:

- **Motogerador** - Utiliza energia gerada pela queima do combustível e libera energia elétrica e gases quentes, que podem ser aproveitados na caldeira de recuperação.
- **Caldeira de recuperação** - Utiliza a energia dos gases quentes para produzir vapor.
- **Caldeira elétrica** - Utiliza energia elétrica para produção de vapor.
- **Caldeira a gás** - Utiliza energia gerada pela queima do combustível para produção de vapor.
- **Chiller de absorção** - Utiliza energia do vapor para produção de água fria.
- **Chiller de compressão** - Utiliza energia elétrica para a produção de água fria.

A Figura 7 mostra um diagrama de blocos com as fontes, os equipamentos que fazem a transformação de energia e as demandas. As perdas devido a irreversibilidades encontradas no sistema não são abordadas no diagrama, porém, durante os cálculos, serão contabilizadas.

4.1.2 Características de um Equipamento Global

As atributos presentes nos blocos da classe equipamento global são importantes para que o programa em C++ gere automaticamente as equações de restrição. Esses atributos representam características físicas dos equipamentos e são detalhados nos tópicos a seguir.

1. Potência nominal (potnom)

É a potência total que um equipamento consegue alcançar. Não necessariamente ele precisa trabalhar com essa potência. O equipamento pode trabalhar com parte da carga nominal.

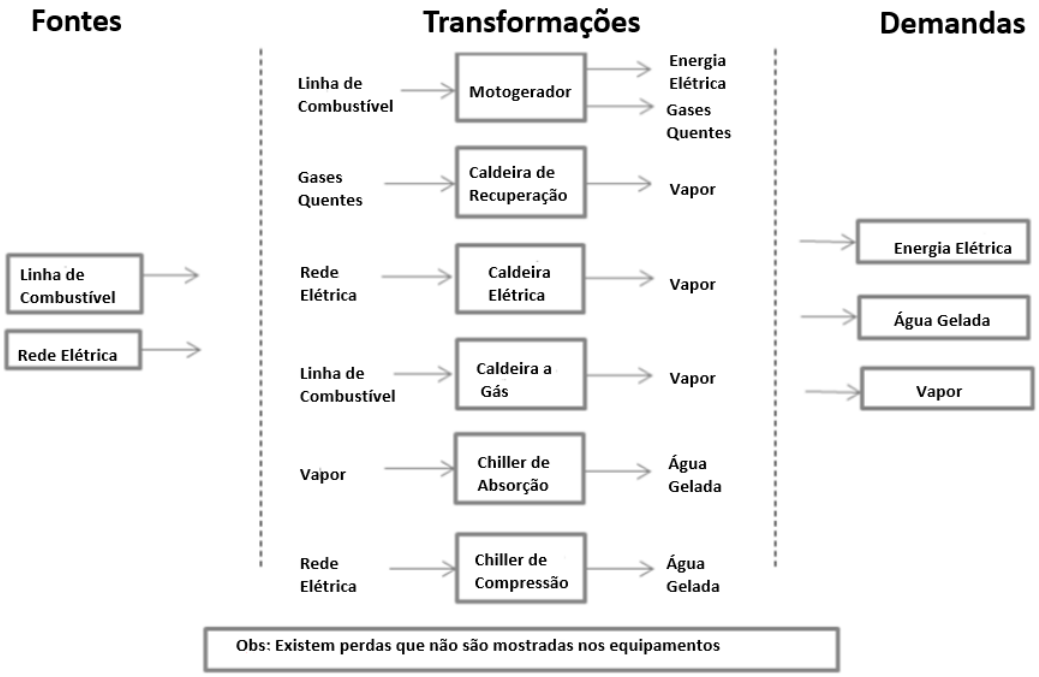
2. Rótulo do bloco (rotequip)

O rótulo do bloco é utilizado para identificar o bloco em questão no programa.

3. Eficiência energética (η)

A eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada após a transformação de energia no bloco.

Figura 7 – Equipamentos e transformações de energia



Fonte: Adaptado de HORNSBY(2014)

4. Tipo de energia de entrada (tipoent)

Caracteriza o tipo de energia que entra no bloco. Os tipos abordados nesse estudo são:

- Energia elétrica.
- Combustível
- Gases quentes
- Vapor de processo
- Água gelada.

5. Tipo de energia de saída (tiposai)

Caracteriza o tipo de energia que saída no bloco, os tipos abordados são os mesmos do tópico anterior.

6. Tarifas de consumo de energia no horário de ponta e fora de ponta (tarconsFP e tarconsHP)

A tarifa de ponta corresponde a tarifa do horário em que o consumo de energia na rede elétrica brasileira é muito mais alto do que nos outros horários, a CELPE adota

de 17:30 às 20:30. Isso porque estão funcionando ao mesmo tempo, além das fábricas, a iluminação pública, e vários pontos de gasto de energia em residências. A tarifa cobrada durante o resto do dia é classificada como tarifa fora de ponta.

7. Custo inicial (precoininom)

Custo inicial de instalação do equipamento, que engloba vários fatores, como tempo de instalação e o valor gasto no equipamento até o início da operação. Este ponto será melhor detalhado na parte de métrica financeira do projeto.

8. Rótulo da potência de saída (rotpotsai)

Identifica o rótulo da potência de saída do bloco em análise, já que um bloco pode ter várias sáidas.

9. Rótulo do bloco vizinho (rotviz)

Identifica pelo rótulo quais blocos estão ligados ao bloco em análise.

10. Porta do bloco vizinho na qual o bloco está ligado (portaviz)

Os vizinhos do bloco podem ter várias saídas. Esta característica indica em qual saída do bloco vizinho anterior está ligado o bloco em análise.

4.1.3 Classificação dos Blocos

Os blocos foram subdivididos em algumas categorias de acordo com a suas funções no programa e características singulares.

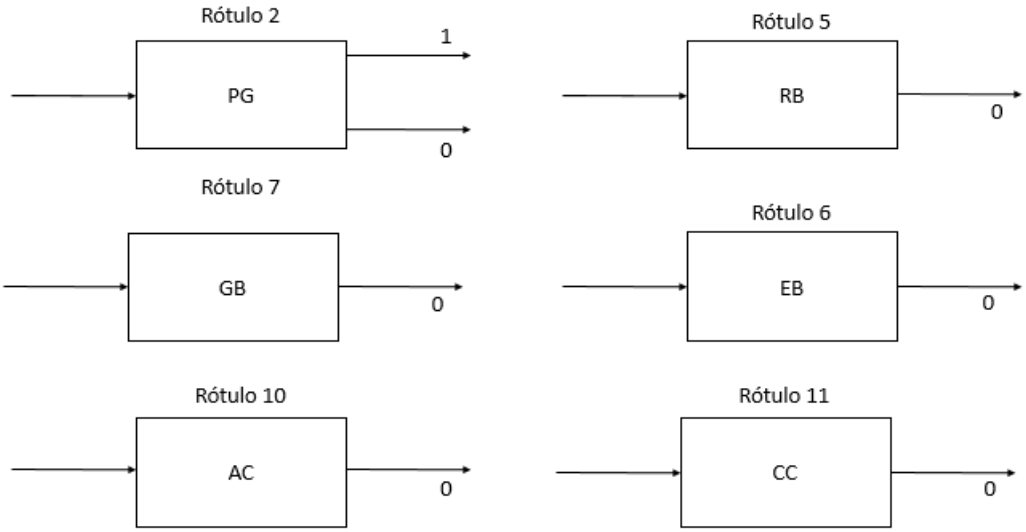
Diferentemente da Figura 6, no programa em C++ os descartes do sistema são representados por blocos específicos. O painel elétrico e o distribuidor de vapor são equivalentes a um bloco de junção ligado a um bloco de separação, de eletricidade e vapor, respectivamente.

1. Equipamento Global

São os blocos que representam os equipamentos utilizados no processo. Esses equipamentos são mostrados na Figura 8.

- PG - Motogerador
- RB - Caldeira de recuperação
- GB - Caldeira a gás
- EB - Caldeira elétrica
- AC - Chiller de absorção
- CC - Chiller de compressão

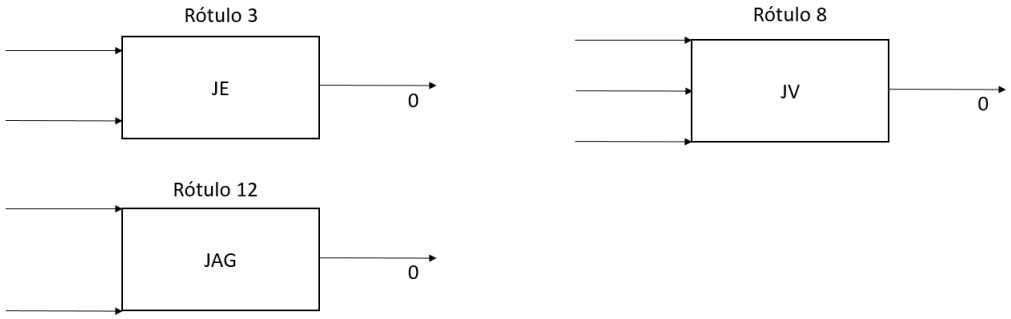
Figura 8 – Equipamentos globais



2. Junção

São blocos que realizam a junção de várias linhas de um determinado tipo de energia e tem como saída apenas uma linha do mesmo tipo. Esse tipo de bloco é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Junções

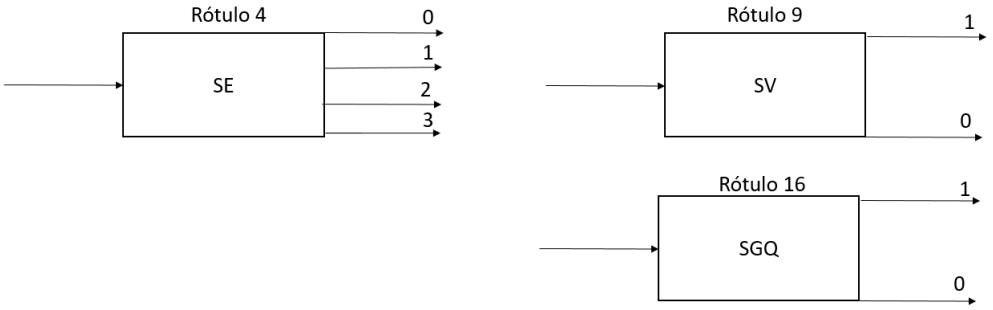


- JE - Junção de energia elétrica
- JAG - Junção de água gelada
- JV - Junção de vapor

3. Separação

São blocos que realizam a separação de uma linha de energia em várias saídas. Esse tipo de bloco é mostrado na figura 10.

Figura 10 – Separações

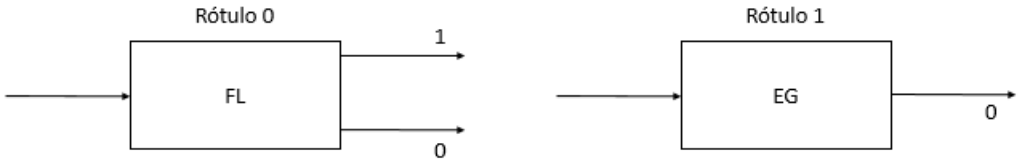


- SE - Separação de energia elétrica
- SV - Separação de vapor
- SGQ - Separação de gás quente

4. Fonte

São blocos que representam as fontes de energia para o funcionamento do processo em geral. Esses blocos são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Fontes



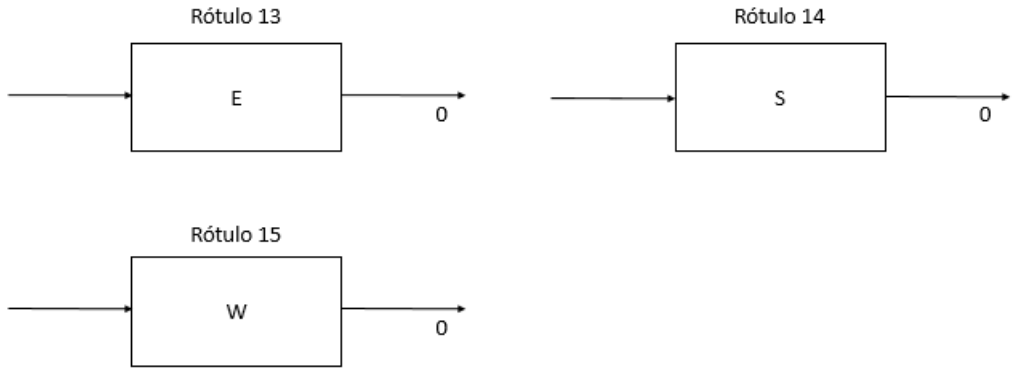
- LC - Linha de combustível.
- RE - Rede elétrica

5. Sumidouro

São os blocos que representam as demandas de energia para o funcionamento do processo em geral. Esses blocos são mostrados na figura 12.

- E - Demanda de energia elétrica
- S - Demanda de vapor
- W - Demanda de água quente

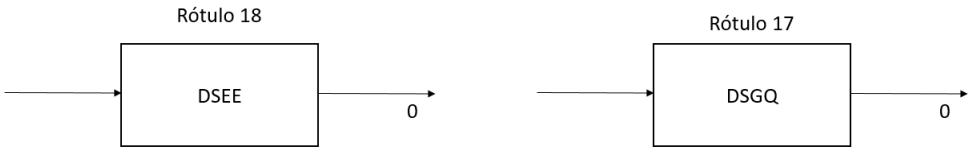
Figura 12 – Sumidouros



6. Descarte

Estes blocos representam a parte de descarte do sistema, que se dá quando a energia gerada no processo é maior que a demanda, necessitando ser descartada, já que nesse estudo não serão abordados sistemas que armazenam energia. Esses blocos são mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Descarte



- DSEE - Descarte de energia elétrica
- DSGQ - Descarte de gás quente

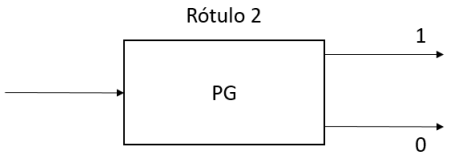
4.1.4 Ligações

O método empregado para realizar a ligação entre os blocos utiliza as características dos equipamentos globais mostradas na seção 4.2.1. Após as ligações serem realizadas, o programa gera automaticamente as equações de restrição através dos métodos característicos da classe. O modo como os objetos serão ligados no programa é mostrado de forma didática a seguir:

1. Rótulo do bloco

O bloco a ser ligado no sistema é escolhido a partir do seu rótulo, definido nas características do bloco.

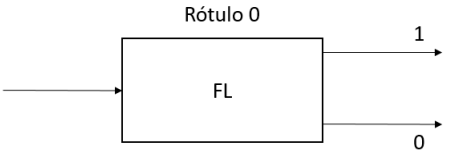
Figura 14 – Bloco com rótulo



2. Bloco Vizinho

O bloco vizinho também é definido a partir das características presentes no bloco. Quando o rotulo vizinho é -1, entende-se que é algo anterior a rede e a linha de combustível.

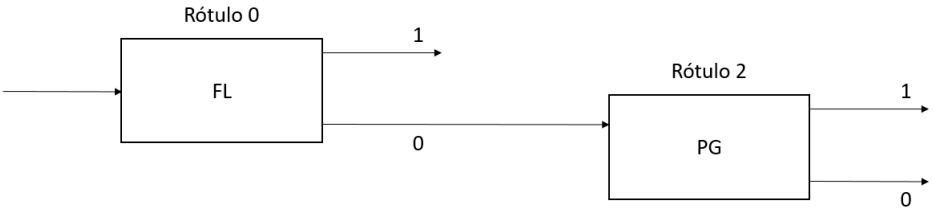
Figura 15 – Definição do bloco vizinho



3. Porta do Vizinho

As saídas são numeradas para identificar no sistema em qual porta ocorrerá a ligação com o bloco vizinho anterior. Após a ligação, alguns parâmetros característicos do bloco são modificados através de métodos automáticos descritos no código do programa.

Figura 16 – Definição da porta do bloco vizinho

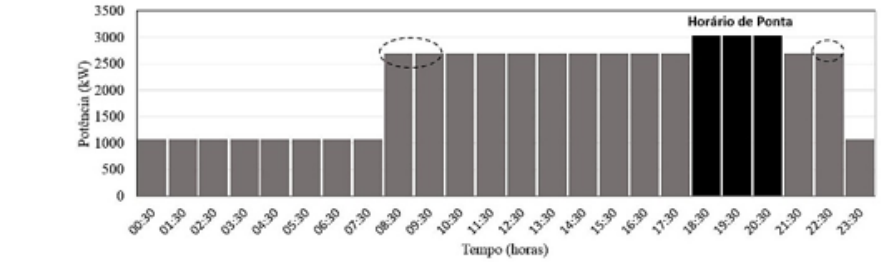


4.1.5 Curvas Horárias de Demanda

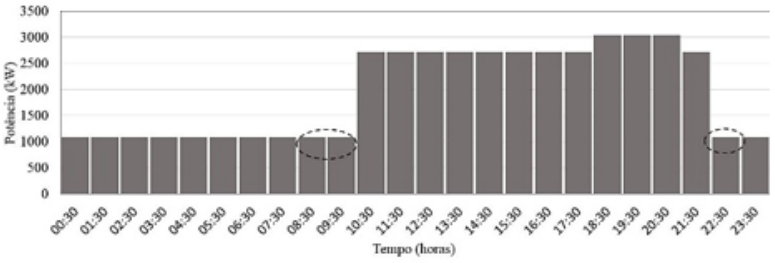
Como descrito na introdução, o principal objetivo do trabalho é otimizar com o MILP, sistemas CCHP projetados para suprir uma determinada demanda energética, comparando aspectos financeiros e de velocidade de execução com outros métodos.

O conhecimento detalhado das curvas horárias de demanda é importante para seleção apropriada do sistema CCHP. No caso a ser estudado, as curvas de demanda foram estimadas através de levantamento energético do setor comercial pernambucano. Onde, segundo Freitas, Magnani e Hornsby (2017), o consumo médio diário de shopping centers de Pernambuco é de aproximadamente 49 MWh.

Figura 17 – Distribuição horária de energia elétrica para os dias úteis e sábados (a) e para os domingos (b).



(a) Dia útil e Sábado



(b) Domingo

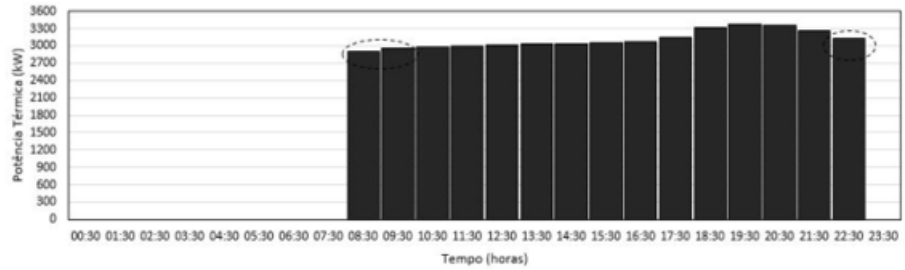
Fonte: (FREITAS; MAGNANI; HORNSBY, 2017)

A Figura 17 mostra o consumo horário para dias úteis, sábados e domingos, estimado a partir de análise dos horários de funcionamento dos estabelecimentos. Os shoppings centers apresentam um perfil singular no domingo, pois tem um horário de funcionamento diferente de dias de semana e do sábado, funcionando de 12 às 21h. Os círculos tracejados indicam os horários em que há diferença no consumo de energia elétrica.

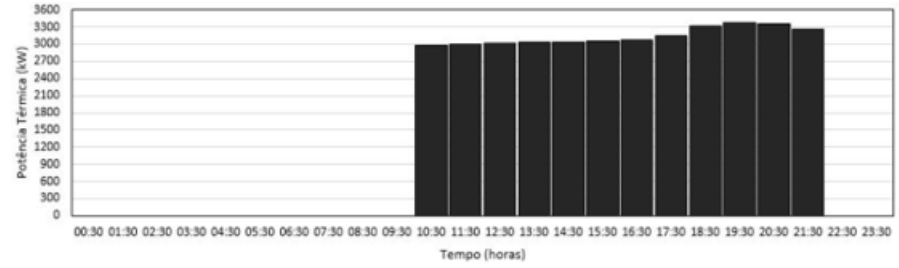
Já a Figura 18 mostra a demanda de carga do sistema de condicionamento térmico para os dias úteis, sábados e domingos. De maneira geral, as curvas de carga do sistema de condicionamento térmico em estabelecimentos comerciais apresentam apenas dois estágios: um de alta carga e outro de baixa. O estágio de alta carga se estabelece no horário de funcionamento do estabelecimento e, nos demais horários, o de baixa carga, como pode ser observado na figura 3.

Para o estudo de caso em questão não houve demanda de vapor, pois, geralmente, os shoppings centers instalados em Pernambuco não demandam cargas

Figura 18 – Curva de carga térmica destinada ao sistema de ar condicionado para os dias úteis e sábados (a) e para os domingos (b).



(a) Dia útil e Sábado



(b) Domingo

Fonte: (FREITAS; MAGNANI; HORNSBY, 2017)

térmicas destinadas ao aquecimento do ambiente.

4.2 Modelagem Matemática

A aplicação do MILP permite que as variáveis de decisão possam ser compostas de valores inteiros e contínuos. Essa é uma característica importante do nosso problema, as linhas de fluxo têm valores contínuos, porém, os equipamentos só podem ter valores discretos (e geralmente não uniformemente espaçados) para as potências nominais (máxima potência). Esse trabalho modela um problema com seis variáveis discretas, que representam a potência nominal do equipamento (1 motogerador, 3 caldeiras e 2 *chillers*), representados por x^*, e 1368 (=19 linhas de energia variando em 72 períodos de tempo) variáveis contínuas, representadas por x. O número total de variáveis é 1374.

4.2.1 Função Objetivo - Valor Presente Líquido (VPL)

A função objetivo do problema é o valor presente líquido (VPL), que é composto pelo investimento inicial (VI) e os custos e receitas operacionais mensais (VE). O VE tem partes positivas e negativas, já que leva em consideração os custos (combustível e eletricidade da rede), e também as revendas (eletricidade vendida, vapor e água

gelada). As equações são baseadas no trabalho de Hornsby (2014), apesar de que no trabalho base os autores otimizaram os custos (minimizando a função objetivo) e nesse trabalho é otimizada a receita (os custos aqui são negativos).

$$\text{VPL} = \text{VI} + \text{VE} \tag{4.1}$$

- VI - Investimento inicial.
- VE - Custos e receitas operacionais mensais do sistema.

O investimento inicial (VI) é obtido multiplicando o coeficiente que representa o custo de investimento, $k_{inv,i}$[$/kW], e a potência nominal de cada equipamento x_i^*. Custos com equipamentos auxiliares (linhas de combustível, linhas de transmissão e distribuidores) estão incluídos no custo inicial do equipamento global. Todos os coeficientes da Equação 4.2 estão em [$/kW]. Como o MILP permite que algumas variáveis sejam inteiras, foi utilizado um multiplicador k_{spc} para forçar essas variáveis a terem um espaçamento maior que a unidade ($k_{spc} = 100$, no presente estudo).

$$\text{VI} = \sum_{i=1}^{n_{eq}} k_{inv,i} k_{spc} x_i^* \tag{4.2}$$

O valor operacional do sistema (VE) é calculado levando em conta os custos mensais de consumo de combustível e eletricidade (termos negativos) e os retornos financeiros por suprir as demandas e venda da eletricidade excedente produzida (termos positivos). A Equação 4.3 representa o cálculo do VE, onde k_{fuel} é a tarifa de combustível, $k_{el,high}$ é a tarifa elétrica no período de ponta, $k_{el,low}$ no período fora de ponta, $k_{el,sell}$ é a tarifa para venda ocasional da energia elétrica excedente. Os últimos 3 coeficientes, $k_{el,int}$, $k_{st,int}$, $k_{cw,int}$, são as tarifas de "venda" interna, respectivamente na forma e eletricidade, vapor e água gelada. Todos os coeficientes da equação 3 são em [$/kWh]. Nesse estudo, temos 6 equipamentos principais (n_{eq} = 6), 19 linhas de energia (n_{lines} = 19), e 72 períodos de tempo (n_t = 72).

$$\begin{aligned}\text{VE} = \mu \sum_{t=1}^{nt} \tau_t \{ & -k_{fuel}(x_{1,t} + x_{2,t}) - [h_t k_{el,high} + (1 - h_t) k_{el,low}] x_{3,t} + \\ & k_{el,sell} x_{11,t} + k_{el,int} x_{12,t} + k_{st,int} x_{16,t} + k_{cw,int}(x_{18,t} + x_{19,t}) \}\end{aligned} \tag{4.3}$$

Na Equação 4.3 o vetor h_t tem valor 1 para o período de ponta e 0 para o período fora de ponta, e o vetor τ_t indica o número de horas mensais que o período de

tempo t representa. Por exemplo, se o dia é dividido em 24 períodos de tempo, e se um certo tempo t representa o período de tempo em um dia de semana, então τ_t terá o valor de 21 (21 períodos de uma dessas horas em um mês). O termo μ representa a correção do número de meses, que é conhecido como fator de valor presente.

4.2.2 Montagem das Restrições

Nesta seção será abordada a forma na qual o programa utiliza as características do bloco para montar as restrições. Ao se utilizar a biblioteca GPLK, no C++, se faz necessário utilizar uma matriz auxiliar, que define o posicionamento no formato ij e o valor numérico c na matrizes A_{eq} e b_{eq}.

A fase de posicionamento é uma das mais críticas do processo, pois a alocação de uma potência de forma errada na matriz A_{eq} pode resultar em análises incorretas, ou até em alguns casos, um sistema sem solução pela programação linear.

A matriz auxiliar define na matriz A_{eq} as características de cada elemento não nulo, como os posicionamentos de linha (restrição) e coluna (potência), o valor de beq relacionado a restrição e valor numérico de cada elemento da equação. A tabela 13 mostra como funciona a matriz auxiliar.

Análisando a primeira linha da tabela 13, deve-se fazer a seguinte conexão com as matrizes A_{eq} e b_{eq}:

Tabela 13 – Exemplo de matriz auxiliar de posicionamento

nn	iAeq	jAeq	beq	cAeq
1	1	1	30	1
2	1	2	30	3
3	2	4	10	1
4	2	5	10	4
5	3	5	1	6
6	3	2	1	6

1. nn = 1 $\rightarrow$ Primeiro elemento não nulo
2. iAeq = 1 $\rightarrow$ O elemento pertence a primeira linha da matriz Aeq
3. jAeq = 1 $\rightarrow$ O elemento pertence a primeira coluna da matriz Aeq
4. beq = 30 $\rightarrow$ O lado direito da equação referente a linha 1 é 30
5. cAeq = 1 $\rightarrow$ O valor do índice do elemento na matriz Aeq é 1

Seguindo a mesma lógica para as outras linhas, a matriz de posicionamento gera as seguintes matrizes A_{eq} e b_{eq} :

Tabela 14 – Exemplos de matrizes geradas a partir da matriz de posicionamento

$\mathbf{A}_{eq}$					$\mathbf{b}_{eq}$
1	3	0	0	0	30
0	0	0	1	4	10
0	0	6	0	6	1

4.2.3 Restrições

Os valores de potência são limitados pelas leis da termodinâmica e pelas eficiências especificas de cada equipamento. O número de restrições é representado por n_{eq} e cada período de tempo por nt. Todas as 1374 variáveis, 1368 contínuas e 6 discretas, são delimitadas no domínio positivo (Equações 4.4 e 4.5), pois todos os equipamentos tem apenas uma direção de energia física possível.

$$0 \leq x_{i,t} \leq \infty; \quad 1 < i < n_{lines}; \quad 1 < t < n_t \tag{4.4}$$

$$0 \leq x_i^* \leq \infty; \quad 1 < i < n_{eq} \tag{4.5}$$

As variáveis são restritas pelas leis da termodinâmica e pelas eficiências especificas de cada equipamento. Existem 14 restrições de igualdade para cada período de tempo (11 paras as eficiências e balanço energético, Equações 4.6 - 4.16, e 3 para as respectivas demandas, Equações 4.17- 4.19), e 6 restrições de desigualdade (Equações 4.20 - 4.25) também para cada período de tempo (restringindo a potência de saída de cada equipamento, x, a sua potência nominal, x^*). Assim, o número total de restrições de igualdade é 1008, e o de restrições de desigualdade é 432. Essas equações foram derivadas de Hornsby (2014).

O motogerador está sujeito as equações 4.6 e 4.7, que representam a parte da energia transferida para os gases quentes (Equação 4.6) e a energia elétrica que o gerador produz em cada tempo (Equação 4.7):

$$x_{4,t} - \eta_{PG,th} x_{2,t} = 0 \tag{4.6}$$

$$x_{7,t} - \eta_{PG,el} x_{2,t} = 0 \tag{4.7}$$

Os gases de exaustão produzidos no motogerador, $x_{4,t}$, são usados pela caldeira de recuperação, $x_{6,t}$, ou dispensados na atmosfera, $x_{5,t}$.

$$x_{4,t} - x_{5,t} - x_{6,t} = 0 \tag{4.8}$$

O painel de distribuição que agrega a energia elétrica que vem da rede e do motogerador é modelado pela Equação 4.9:

$$(x_{8,t} + x_{9,t} + x_{10,t}) - \eta_{EP} x_{7,t} - \eta_{EP} x_{3,t} = 0 \tag{4.9}$$

A eletricidade que não é utilizada no *chiller* de compressão ou na caldeira elétrica pode ser vendida, $x_{11,t}$, ou usada para suprir a demanda, $x_{12,t}$.

$$x_{10,t} - x_{11,t} - x_{12,t} = 0 \tag{4.10}$$

A Equação 4.11 representa os fluxos energéticos do distribuidor de vapor, levando em consideração a eficiência, $x_{12,t}$.

$$x_{16,t} - x_{17,t} - \eta_{SM} x_{13,t} - \eta_{SM} x_{14,t} - \eta_{SM} x_{15,t} = 0 \tag{4.11}$$

As três caldeiras, Equações 4.12 - 4.14, tem eficiências especificas relacionando a saída a potência de entrada:

$$x_{14,t} - \eta_{RB} x_{6,t} = 0 \tag{4.12}$$

$$x_{15,t} - \eta_{EB} x_{8,t} = 0 \tag{4.13}$$

$$x_{13,t} - \eta_{GB} x_{1,t} = 0 \tag{4.14}$$

Os *chillers* são representados pelas Equações 4.15 e 4.16, que relacionam a potência de resfriamento com a potência consumida através do COP:

$$x_{18,t} - \mathrm{COP}_{AC} x_{17,t} = 0 \tag{4.15}$$

$$x_{19,t} - \mathrm{COP}_{CC} x_{9,t} = 0 \tag{4.16}$$

Dado os vetores de demanda de água gelada (W_t), eletricidade (E_t) e vapor (S_t), as últimas equações de restrição são formuladas pelas Equações 4.17 - 4.19:

$$x_{18,t} + x_{19,t} = W_t \tag{4.17}$$

$$x_{12,t} = E_t \tag{4.18}$$

$$x_{16,t} = S_t \tag{4.19}$$

As ultimas 432 (=6.72) inequações de restrição, Equações 4.20 - 4.25, definem que a potência de saída de cada equipamento principal deve ser sempre menor do que a potência nominal. Deve-se notar que as variáveis descritas, x^*, não variam com o tempo.

$$k_{spc}x_1^* - x_{13,t} \geq 0 \tag{4.20}$$

$$k_{spc}x_2^* - x_{7,t} \geq 0 \tag{4.21}$$

$$k_{spc}x_3^* - x_{14,t} \geq 0 \tag{4.22}$$

$$k_{spc}x_4^* - x_{15,t} \geq 0 \tag{4.23}$$

$$k_{spc}x_5^* - x_{18,t} \geq 0 \tag{4.24}$$

$$k_{spc}x_6^* - x_{19,t} \geq 0 \tag{4.25}$$

4.3 Método Híbrido Baseado no MILP (BS/PL)

Essa seção mostrará as etapas que levaram ao desenvolvimento do novo método híbrido baseado no MILP. Esse novo estudo teve como base o método híbrido (BE/PL) utilizado por Hornsby (2014), que utilizava a seguinte metodologia:

Proposição de um Sistema Genérico: O sistema genérico é definido a partir das fontes e demandas energéticas existentes, levando em consideração os tipos e potências dos equipamentos disponíveis para a aquisição.

Pré-Seleção: Escolha de potências baseada nas demandas máximas exigidas pelo sistema. As potências são manualmente selecionadas a partir de opções disponíveis no mercado. Neste processo também é levado em consideração a possibilidade de os equipamentos terem potência nula, permitindo assim a inexistência do equipamento no sistema.

Busca Exaustiva: Nessa etapa são avaliadas todas as possíveis permutações levantadas na etapa de pré-seleção.

Programação Linear: Para cada permutação, utiliza-se o método de programação linear para otimizar a operação do sistema de modo que ocorra a maximização do VPL.

Ao se aplicar a metodologia utilizada no método híbrido original (BE/PL) no bloco correspondente a Figura 19, tem-se a função objetivo dada pela Equação 4.26 submetida ao sistema de equações 4.27.

Figura 19 – Equipamento global

$$y = k_1 x_1 + k_{inv,eq} N + k_3 x_2 \tag{4.26}$$

$$\begin{cases} \eta x_1 - x_2 = 0 \\ 0 \leq x_2 \leq N \\ N = \{53, 427, 1228\} \end{cases} \tag{4.27}$$

Neste exemplo, a potência nominal do equipamento é representada por N, que é um valor inserido no programa pelo usuário após a fase de pré-seleção baseado nos valores de demanda do sistema. Após a fase de pré-seleção é realizada a busca exaustiva, onde, tem-se para cada N_i:

$$y_i = k_1 x_1 + k_{inv,eq} N_i + k_3 x_2 \tag{4.28}$$

$$\begin{cases} \eta x_1 - x_2 = 0 \\ 0 \leq x_2 \leq N_i \end{cases} \tag{4.29}$$

Para cada permutação realizada na busca exaustiva, o sistema otimiza y_i utilizando o método clássico de programação linear, submetido as restrições representadas pelo sistema de equações 4.38. Após todas as permutações terem sido realizadas, o valor da função y otimizada é:

$$y = max\,(y_i) \tag{4.30}$$

Devido aos diversos equipamentos presentes no sistema genérico (GB, RB, EB, CC, AC e PG) e suas várias potências que devem ser levantadas na fase de pré-seleção, o processo de busca exaustiva tem que realizar um elevado número de permutações, deixando o processo de otimização lento. Para aumentar a velocidade de execução do programa e diminuir o tempo utilizado na busca exaustiva, foram propostas as seguintes modificações para os equipamentos globais:

- Inserir variáveis especiais, que não dependem do tempo.
- Utilizar o MILP para trabalhar com variáveis discretas.
- Limites superiores com inequações.

As variáveis chamadas de especiais, são aquelas não dependem do tempo e são aplicadas para definir as potências nominais dos equipamentos globais. A potência x_3^* mostrada na Figura 19 representa a potência nominal do bloco. Com as modificações realizadas, a nova representação do problema é dada por:

$$y = k_1 x_1 + k_{inv,eq} x_3^* + k_3 x_2 \tag{4.31}$$

$$\begin{cases} \eta x_1 - x_2 = 0 \\ x_3^* - x_2 \geq 0 \\ x_3^* = N \\ N = \{53, 427, 1228\} \end{cases} \tag{4.32}$$

Para eliminar a fase de pré-seleção manual dos equipamentos e adequar as potências ao método MILP, foram inseridas condições de inequação nas restrições. Além disso, com a utilização do MILP, as potências nominais foram definidas como variáveis inteiras. Com essas modificações, o sistema de equações ficou definido como:

$$y = k_1 x_1 + k_{inv,eq} k_{spc} x_3^* + k_3 x_2 \tag{4.33}$$

$$\begin{cases} \eta x_1 - x_2 = 0 \\ k_{spc} x_3^* - x_2 \geq 0 \\ 0 \leq x_3^* \leq \infty \\ x_3^* \in Z \end{cases} \tag{4.34}$$

O método baseado no MILP não utiliza as etapas de pré-seleção e busca exaustiva, diminuindo o tempo de otimização necessário para resolver o problema, porém, nem sempre os resultados obtidos pela utilização do método representam

equipamentos reais, pois as opções de equipamentos comerciais não apresentam potências uniformemente espaçadas, o que pode ser um problema em termos de qualidade do resultado. O fator γ é utilizado para espaçar os valores de potência que o método analisa. Por exemplo, se o fator for 10, o MILP só escolherá potências nominais multiplas de 10.

Para resolver esse problema, foi proposto um novo método híbrido (BS/PL) entre busca exaustiva e MILP com a intenção de agregar a aproximação com a realidade do primeiro com a velocidade de otimização do segundo. O método é descrito em 5 passos:

1. **Proposição de um Sistema Genérico**: O sistema genérico é definido a partir das fontes e demandas energéticas existentes.
2. **Pré-seleção**: Escolha de potências baseada nas demandas máximas exigidas pelo sistema. As potências são manualmente selecionadas a partir de opções disponíveis no mercado.
3. **Programação Linear Inteira Mista**: Nesta etapa é aplicado o método MILP, com as potências nominais dos equipamentos assumindo valores inteiros e adicionando algumas equações nas restrições em relação ao método híbrido.
4. **Busca Seletiva**: Neste ponto, ao invés de avaliar todas as permutações possíveis, serão analisadas apenas as potências imediatamente superiores e inferiores ao resultado ótimo encontrado no MILP.
5. **Programação Linear**: Para cada permutação, utiliza-se o método de programação linear para otimizar a operação do sistema de modo que ocorra a maximização do VPL.

Para exemplificar o funcionamento da busca seletiva, vamos assumir que para um sistema térmico genérico, as potências pré-selecionadas foram:

Tabela 15 – Exemplo de potências pré-selecionadas

Variável	**Equipamento**	***Potência Nominal - kW***			
N_{PG}	Motogerador (PG)	0	1760	3050	5220
N_{GB}	Caldeira a Gás (GB)	0		2790	5580
N_{RB}	Caldeira de Recuperação (RB)	0		2790	5580
N_{EB}	Caldeira Elétrica (EB)	0		2790	5580
N_{AC}	*Chiller* de Absorção	0		1675	3350
N_{CC}	*Chiller* de Compressão	0		1675	3350

Após a otimização com a programação linear inteira mista, as potências definidas como ótimas foram: N_{PG} = 1900kW; N_{GB} =1200kW; N_{RB}=1400kW; N_{EB}=1300kW; N_{AC} =2200kW; N_{CC}=1100kW;

Ao invés de realizar permutações com todas as potências mostradas na pré-seleção, serão feitas permutações apenas com as potências imediatamente inferiores e superiores as potências encontradas no MILP, que nesse caso, são:

Tabela 16 – Potências que serão permutadas

Variável	**Equipamento**	***Potência Nominal - kW***	
N_{PG}	Motogerador (PG)	1760	3050
N_{GB}	Caldeira a Gás (GB)	0	2790
N_{RB}	Caldeira de Recuperação (RB)	0	2790
N_{EB}	Caldeira Elétrica (EB)	0	2790
N_{AC}	*Chiller* de Absorção	1675	3350
N_{CC}	*Chiller* de Compressão	0	1675

4.3.1 Exemplo de Modelagem

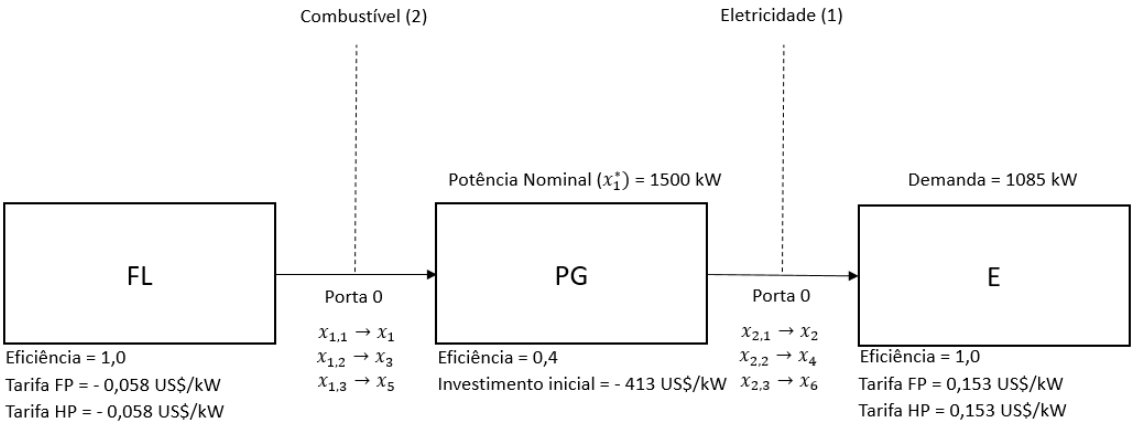
Para mostrar de maneira didática como o problema de otimização é modelado na nova metodologia, será mostrada uma representação gráfica dos blocos no sistema. A Tabela 17 mostra as características de 3 blocos que são representados graficamente pela Figura 20.

Tabela 17 – Características dos 3 blocos utilizados como exemplo

Característica	**Bloco 0**	**Bloco 2**	**Bloco 13**
potnom	∞	1500	1085
rotequip	0	2	13
η	1	0,4	1
tipoent	2	2	1
tiposai	2	1	1
tarconsFP	- 0,058	0	0,153
tarconsHP	- 0,058	0	0,153
precoininom (k_{inv})	0	-413	0
rotviz	-1	0	2
portaviz	-1	0	0

A potência em cada linha é representada por x[kW]. A programação linear exige uma variável vetorial de uma dimensão, de modo que as potências são representadas

Figura 20 – Representação dos blocos a partir de suas características



por um único índice, não podendo ser representadas no formato $x_{i,t}$, onde i representa a linha de potência e t o tempo. Por exemplo, $x_{(t-1)np+1}$ representa a energia gerada pelo combustível (linha 1) no tempo t, em direção ao motogerador. Como t varia de 1 a nt = 3 e np = 2 fluxos, para cada cenário temos uma matriz coluna com 6 linhas (3x2).

Cada grupo de 2 linhas da matriz corresponde às np = 2 potências ocorridas em cada intervalo de tempo. Quando t = 1 temos a potência x_1 no tempo 1 na linha 1 da matriz. Quando t = 2, tem-se a potência x_1 no tempo 2 ocupando a linha 3 da matriz e assim por diante. O mesmo vale para as demais potências de saída apresentadas na Figura 20.

Para o exemplo estudado, o VPL é dado por:

$$\text{VPL} = \text{VI} + \text{VE} \tag{4.35}$$

onde,

$$\text{VI} = k_{inv,PG} x_1^* \tag{4.36}$$

$$\text{VE} = k_{fuel}(x_1 + x_3 + x_5) + k_{el,int}(x_2 + x_4 + x_6) \tag{4.37}$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\begin{cases} x_1\eta - x_2 = 0 \\ x_3\eta - x_4 = 0 \\ x_5\eta - x_6 = 0 \\ x_1^* - x_2 \geq 0 \\ x_1^* - x_4 \geq 0 \\ x_1^* - x_6 \geq 0 \\ x_2 = E_1 \\ x_4 = E_2 \\ x_6 = E_3 \end{cases} \tag{4.38}$$

Onde as potências estão submetidas as seguintes restrições de desigualdade:

$$0 \leq x_{(t-1)np+1} \leq \infty \tag{4.39}$$

4.4 Verificação da implementação do MILP

Um dos pontos importantes em uma modificação ou introdução de um novo método é a fase de verificação do código através de comparações com os resultados obtidos em outros métodos. Para realizar a verificação do método, Vale (2017) criou um arquivo em *Excel* capaz avaliar um sistema de cogeração sujeito as seguintes simplificações:

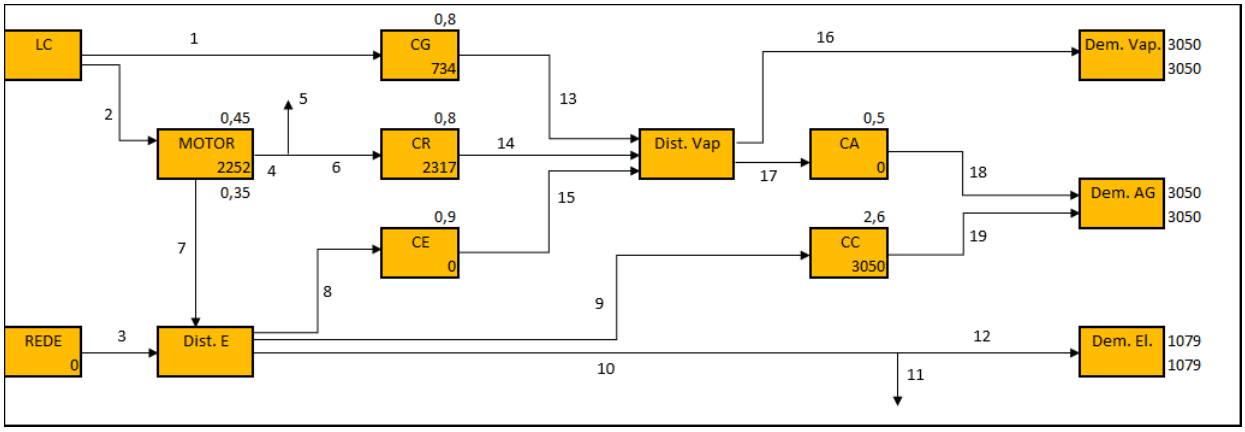
1. Demanda fixa em todos os horários do dia;
2. Tarifa de investimento de rede e linha de combustível = 0;
3. Tarifa da energia elétrica em horário de ponta igual ao de fora de ponta;
4. Valor da tarifa da demanda = 0;

Os dados foram retirados do programa em C++ e distribuídos de acordo com as tabelas mostradas no Apêndice 1, divididos em informações financeiras, ambientais e de potência.

Foi criado um modelo gráfico para auxiliar na visualização dos resultados, que é mostrado na Figura 21. Os dados de potência utilizados no *Excel* foram obtidos a partir da otimização com o MILP, aplicando as mesmas simplificações descritas anteriormente.

Feita a simulação no *Excel* com as potências encontradas pelo MILP, os resultados encontrados para valor inicial, valor mensal e valor presente líquido foram os

Figura 21 – Modelo gráfico do arquivo em *Excel*



Fonte: (VALE, 2017)

mesmos. Além disso, quando as potências e dados foram inseridos no arquivo em *Matlab* utilizado por Souza (2017), a otimização também retornou os mesmos valores de VI, VM e VPL.

Tabela 18 – Resultados das simulações com o C++, *Excel* e *Matlab*

Variável	C++ (MILP)	*Excel*	*Matlab*
VI	-R$ 8.010.780,00	-R$ 8.010.780,00	-R$ 8.010.780,00
VM	R$ 51.203.046,19	R$ 51.203.046,19	R$ 51.203.046,19
VPL	R$ 43.192.266,19	R$ 43.192.266,19	R$ 43.192.266,19

.

4.5 Dados Financeiros

Nesta seção são abordados os principais dados financeiros para a otimização do sistema de cogeração, onde são apresentados os custos e ganhos financeiros, analisando o impacto inicial e o gerado pela operação do sistema como um todo. Os principais parâmetros analisados são:

- Tarifa de combustível;
- Custo da eletricidade comprada da rede, além do valor de venda dos excedentes;
- Custos de equipamentos;
- Impostos;

4.5.1 Energia Elétrica

Os dados financeiros relacionados a energia elétrica utilizam o modelo de tarifação horossazonal, que de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2015c), leva em consideração as variações de carga ao longo do dia, aplicando tarifas diferentes a depender do dia e horário de utilização. Este tipo de modalidade é dividido em 2 vertentes, que são:

- Horossazonal Azul - Tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia (LOPES, 2002).
- Horossazonal Verde - Tarifas diferentes de consumo para horário de ponta e fora de ponta, porém, essa modalidade apresenta apenas uma única tarifa de demanda, independente do horário de utilização (LOPES, 2002).

As tarifas utilizadas nos estudos foram baseadas nos dados fornecidos pela CELPE (2015). Para simplificar a otimização, como a função max($x_{3,t}$) para calcular a máxima potência não seria linear, optou-se por agregar as duas tarifas (consumo e máxima potência) em apenas uma. Os valores combinados são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Tarifas elétricas combinadas

Dado	Tarifa (US$/kWh)	Fonte
$k_{el,high}$	0,360	(CELPE, 2015)
$k_{el,low}$	0,138	(CELPE, 2015)

4.5.2 Gás Natural

A tarifação do gás natural, de acordo com a Companhia Pernambucana de Gás (2015), é baseada no consumo em metros cúbicos. A tarifa depende do setor, do consumo mínimo diário e do consumo final mensal.

Em Pernambuco é praticada a tarifação reduzida para o gás natural utilizado em sistemas de cogeração, que é o objeto de estudo desta dissertação. Para a faixa de consumo estudada, o valor da tarifa considerada, de acordo com os dados levantados por Freitas (2016), é de 0,585509 US$/m^3.

O valor do poder calorífico inferior para o gás natural, segundo Freitas (2016), é de 35564 kJ/m^3.

4.5.3 Custos de Investimento e Eficiências dos Equipamentos

A aquisição dos equipamentos requer um investimento financeiro inicial, que inclui custos adicionais de importação, impostos e instalação dos equipamentos. Para cada equipamento instalado, também é contabilizado o impacto ambiental que foi gerado para a máquina ser produzida. Os custos financeiros e ambientais dos equipamentos são mostrados na tabela 20.

Tabela 20 – Custos de investimento financeiro e ambiental dos equipamentos

Dado	Equipamento	Fin. (US$/kW)	Amb. (10^{-6} US$/kW)	Fonte
k_{invPG}	PG	413,0	138,8*	(BARBOSA et al., 2009)
k_{invCG}	GB	126,0	14,4*	(STYRELSEN, 2012)
k_{invCR}	RB	220,0	25,5*	(TEIXEIRA; JÚNIOR, 2001)
k_{invCE}	EB	233,0	16,8*	(STYRELSEN, 2012)
k_{invCA}	AC	863,0	43,6*	(BARBOSA et al., 2009)
k_{invCC}	CC	705,0	31,4*	(BARBOSA et al., 2009)

$*$ Custos de investimento ambientais foram extraídos de (HORNSBY, 2014).

O rendimento dos equipamentos é outro aspecto importante, pois é através desse parâmetro que é possível dimensionar e mensurar o aproveitamento energético nos processos de conversão de cada equipamento. Os rendimentos utilizados na simulação computacional são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Rendimentos dos equipamentos

Dado	Descrição	Valor	Fonte
ηPG_{th}	Rend. Térmico do Motogerador	0,40	(WILLIS, 2004)
ηPG_{el}	Rend. Elétrico do Motogerador	0,35	(WU; WANG, 2006)
ηGB	Rend. Caldeira a Gás	0,85	(XIE et al., 2007)
ηRB	Rend. Caldeira de Recuperação	0,80	(TEIXEIRA; JÚNIOR, 2001)
ηEB	Rend. Caldeira Elétrica	0,98	(XIE et al., 2007)
COP_{AC}	COP Chiller de Absorção	0,98	(WU; WANG, 2006)
COP_{CC}	COP Chiller de Compressão	0,60	(MACEDO, 2007)

4.5.4 Venda Interna e Externa de Energia

O suprimento das demandas traz um ganho financeiro ao sistema, gerando uma renda para cada kW de energia, vapor, ou água gelada gerado, valores estes, que são incluídos na função objetivo.

Além da potência demandada, é possível vender ocasionalmente o excesso de energia, gerando 2 ganhos financeiros, tanto pela venda interna (demanda), quanto pela venda externa (ganho com a venda do excedente). No caso do vapor e água

gelada, não foram associados ganhos com a venda do excedente. Os valores são mostrados na tabela 22.

Tabela 22 – Preço de venda interna e externa de energia, água gelada e vapor

Dado	Descrição	Tarifa (US$/kWh)
$k_{vendaINT}$	Preço de venda interna de energia elétrica	0,306
$k_{vendaEXT}$	Preço de venda externa de energia elétrica	0,050
$k_{vendaVAPOR}$	Preço de venda interna de vapor	0,080
$k_{vendaAG}$	Preço de venda interna de água gelada	0,082

Fonte: (HORNSBY, 2014)

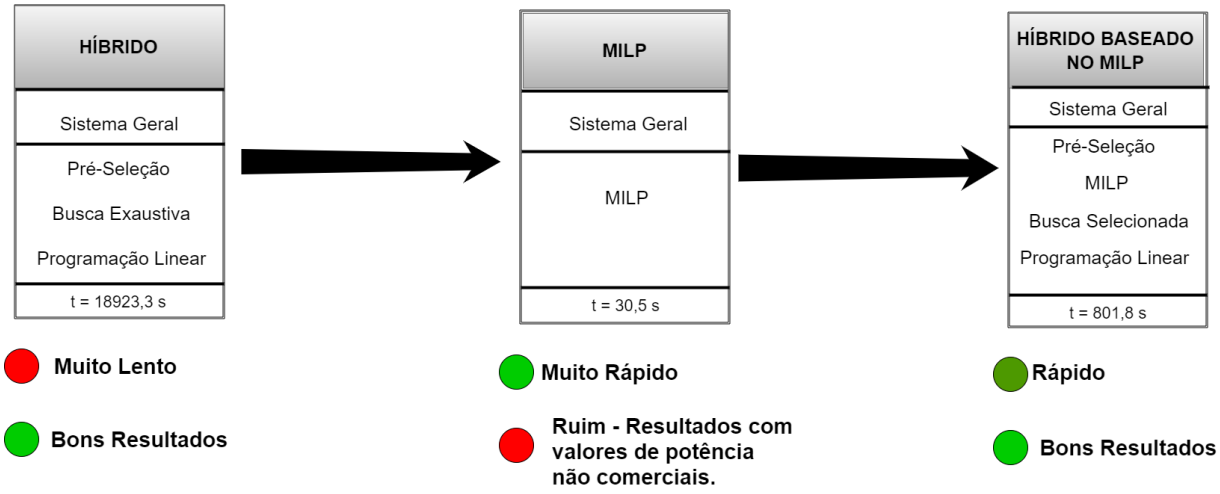
5 ESTUDOS DE CASO

Neste capitulo serão realizados diversos estudos de caso, utilizando três métodos distintos. O foco dos estudos será analisar os valores de VPL e o tempo de otimização de cada método. Todas as otimizações são realizadas levando em consideração apenas os aspectos financeiros.

A análise paramétrica será realizada multiplicando a tarifa de energia elétrica por um fator (β) que varia de 0,4 a 2, ou seja, uma redução de 60% até o aumento de 100% da tarifa. A análise da variação dessa tarifa é importante, pois esse parâmetro sofre influência das condições hidrológicas dos reservatórios e de escolhas por fontes de energia mais caras, sofrendo diversos reajustes ao longo do tempo.

Os estudos de caso seguiram a ordem mostrada na Figura 22, que detalha em ordem cronológica o desenvolvimento do novo método, além de mostrar as vantagens e desvantagens de cada método, que serão detalhadas nas seções a seguir.

Figura 22 – Desenvolvimento do método híbrido baseado no MILP



5.1 Métodos de Otimização

Nesta sessão serão mostradas as principais diferenças entre os três métodos de otimização estudados. Todos os métodos começam com a proposição de um sistema genérico. A principal diferença é como eles lidam com as variáveis discretas de potência nominal (x_i^*).

1. Método 1 (BE/PL): Método híbrido que mistura a busca exaustiva e a programação linear. Nesse método, todas as combinações possíveis (Tabela 23) são

testadas, resultando em 1458 (=3.6.3.3.3.3) sistemas testados. Para cada uma das permutações, as variáveis contínuas resultantes são otimizadas usando o método de programação linear (otimização operacional). O melhor valor de VPL de todas as permutações é o valor ótimo geral.

2. Método 2 (MILP): Nesse método é feita uma simplificação onde 6 variáveis são discretas, necessitando apenas de uma otimização. O problema da solução ótima proposta é que o resultado geralmente não contempla apenas potências de equipamentos comerciais. Se os equipamentos tivessem potências uniformemente espaçadas esse problema não existiria, porém não são.

3. Método 3 (BS/PL): Método híbrido que mistura o MILP, a busca seletiva e a programação linear. Nesse caso é utilizada a solução ótima do método MILP para definir quais equipamentos serão testados usando o método 1. Por exemplo, se o resultado do MILP encontrado para a caldeira de recuperação for 2000kW, essa potência não está disponível na lista de potências da Tabela 23, então será realizada a busca exaustiva apenas com a primeira potência inferior e a primeira potência superior. Dessa forma, o número de sistemas estudados no método 1 cai de 1458 para 64 (=2.2.2.2.2.2).

5.2 Otimização do Sistema - Método 1 (BE/PL)

Neste estudo foi realizada a otimização do sistema utilizando o método híbrido (BE/PL) descrito por Hornsby (2014) para maximizar a função VPL, sujeita a variação da tarifa de energia elétrica. Este método utiliza 4 fases distintas para otimização do problema, que são:

1. Proposição de um Sistema Genérico;
2. Pré-Seleção;
3. Busca Exaustiva;
4. Programação Linear;

Uma vez que o Método de otimização 1 é o mais preciso, por utilizar a busca exaustiva para testar todos os equipamentos possíveis, esse método será utilizado para estudar o comportamento da solução. Depois disso, o Método 1 é comparado a outros dois métodos em relação a precisão e o esforço computacional. Para estudar os métodos em uma ampla gama de situações, realizou-se uma variação paramétrica da tarifa de eletricidade, multiplicando pelo fator β variando de 0,4 a 2,0 (em passos de 0,1), estudando a solução em situações no qual a eletricidade é barata ou cara.

Figura 23 – Evolução de VPL como função da tarifa de energia elétrica para o Método 1. As referências a-d indicam a topologia do sistema ideal em cada situação, conforme mostrado na Figura 24.

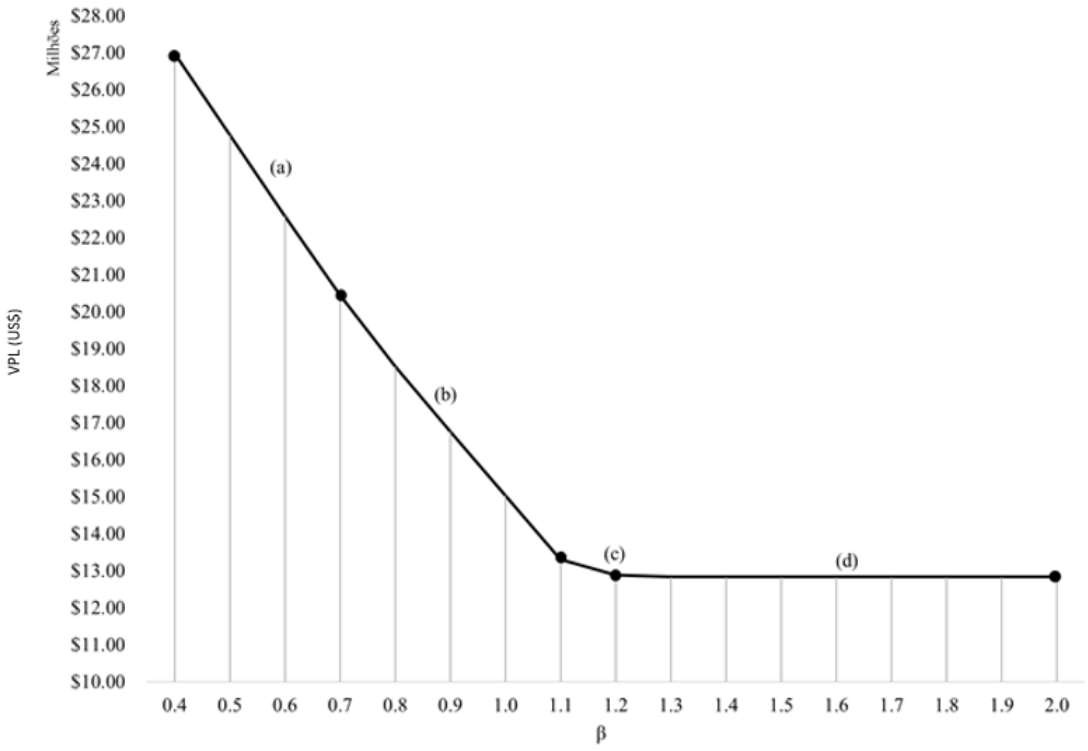


Tabela 23 – Potências pré-selecionadas

Variável	**Equipamento**	***Potência Nominal - kW***					
N_{PG}	Motogerador (PG)	0	1290	1760	3050	5220	7395
N_{GB}	Caldeira a Gás (GB)	0		2790		5580	
N_{RB}	Caldeira de Recuperação (RB)	0		2790		5580	
N_{EB}	Caldeira Elétrica (EB)	0		2790		5580	
N_{AC}	Chiller de Absorção	0		1675		3350	
N_{CC}	Chiller de Compressão	0		1675		3350	

A Figura 23 mostra a evolução do VPL resultante das soluções ótimas com a tarifa de eletricidade variando. Dependendo do fator β, encontram-se quatro sistemas distintos, mostrados na Figura 24: sistema convencional puro (0,4 $\leq \beta \leq$ 0,6, Figura 24.a), que compra toda a eletricidade da rede; sistema convencional com um motogerador (0,7 $\leq \beta \leq$ 1,1, Figura 24.b), que usa o motogerador para o período de ponta; sistema de cogeração com rede elétrica (β = 1,2, Figura 24.c), que usa a rede elétrica

apenas nos domingos quando o shopping fecha; e o sistema de cogeração (1,3 $\leq \beta \leq$ 2,0, Figura 24.d), onde toda a eletricidade é fornecida pelo motogerador.

A Tabela 24 mostra a potência nominal dos equipamentos ótimos obtidos. Deve-se notar que, embora os sistemas possam ser qualitativamente organizados como os quatro apresentados na Figura 24, há mudanças nas potências nominais à medida que a tarifa da eletricidade aumenta. Em geral, os sistemas ótimos migram do convencional para um sistema de cogeração pura.

A segunda coluna da Tabela 24 mostra a máxima potência da rede. É possível ver a decrescente participação da rede a medida que a tarifa de energia elétrica aumenta.

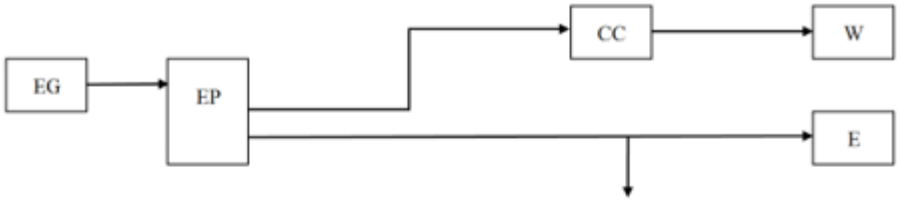
Tabela 24 – Potências escolhidas pelo método 1 em função do fator (β)

	Método 1 (BE/PL)						
β	**EG**	**PG**	**RB**	**EB**	**GB**	**AC**	**CC**
0,4	3020	0	0	0	0	0	3350
0,5	3020	0	0	0	0	0	3350
0,6	3020	0	0	0	0	0	3350
0,7	1730	1290	0	0	0	0	3350
0,8	1260	1760	0	0	0	0	3350
0,9	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,0	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,1	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,2	1085	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,3	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,4	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,5	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,6	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,7	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,8	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,9	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
2,0	0	3050	2790	0	2790	1675	1675

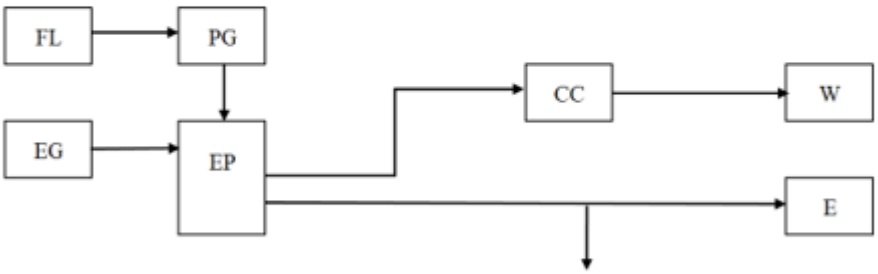
Os valores apresentados na Tabela 24, para cada tarifa, podem ser utilizados para analisar a solução, lembrando que a solução inclui 1374 variáveis, não apenas as 7. Por exemplo, por uma análise temporal das variáveis $x_{3,t}$ (eletricidade da rede pública) e $x_{7,t}$ (eletricidade motogerador) é possível encontrar que para β = 0,8 o sistema usa motogerador e rede pública no período de ponta, mas para β = 0,9, apenas o motogerador é usado neste período (a rede pública é usada nos períodos fora de ponta, para ambos os valores de β). A Tabela 25 mostra de forma detalhada os diversos modos de operação do sistema em função do fator β.

Para realizar a otimização do sistema, o Método 1 (BE/PL) teve que realizar 24786 (=6.3.3.3.3.3.17) permutações, com 1458 permutações devido as opções de equipamentos, multiplicado pelos 17 valores da tarifa a serem analisados. O tempo da

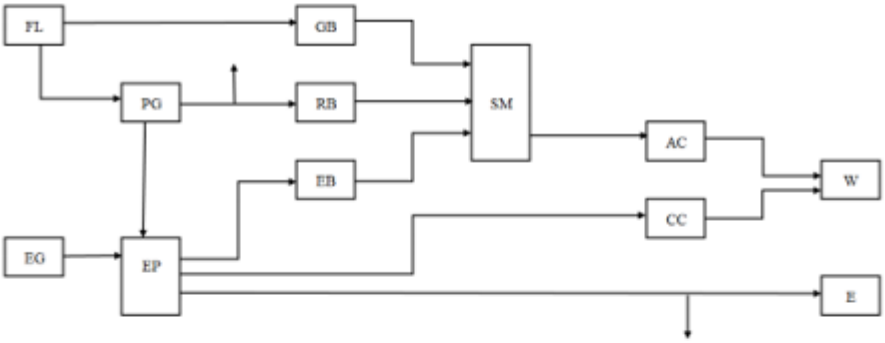
Figura 24 – Sistema ótimo para as diferentes faixas de β (a-d)



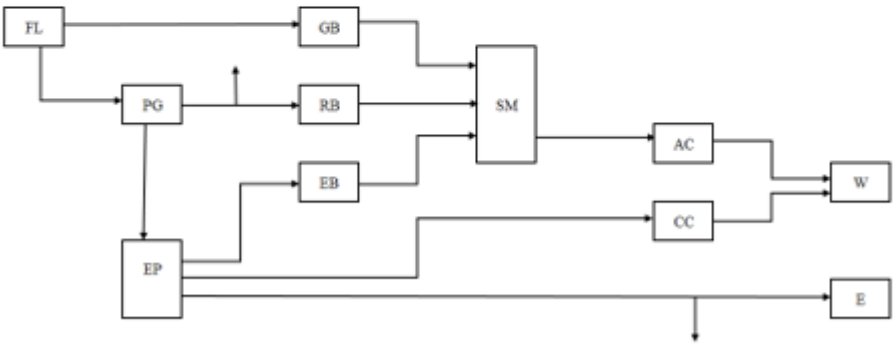
(a) Sistema convencional puro (β= [0.4–0.6] para o método 1 e método 2)



(b) Sistema convencional com motogerador (β= [0.7–1.1 para o método 1, and β= [0.7–1.0] para o método 2)



(c) Sistema de cogeração com rede (β= [1.2] para o método 1, and β= [1.1–1.2] para o método 2)



(d) Sistema de cogeração puro (β= [1.3-2.0] para os métodos 1 e 2

.

otimização em um computador equipado com um processador AMD FX8320 a 3,5GHz, 8GB de memória RAM DDR3 1333MHz e utilizando o sistema operacional Windows 10, foi de 18923,3 segundos (5,25 horas). Durante o processo de otimização, apenas os programas essenciais ao Windows rodaram em segundo plano.

Tabela 25 – Modo de operação do sistema para os diversos valores de β nos métodos 1 e 3

	Shopping fechado	Shopping aberto	
FATOR	FP	FP	HP
0,4	Rede	Rede	Rede
0,5	Rede	Rede	Rede
0,6	Rede	Rede	Rede
0,7	Rede	Rede	Rede + Motor
0,8	Rede	Rede	Rede + Motor
0,9	Rede	Rede	Motor
1,0	Rede	Rede	Motor
1,1	Rede	Rede	Motor
1,2	Rede	Cogeração	Cogeração
1,3	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,4	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,5	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,6	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,7	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,8	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,9	Cogeração	Cogeração	Cogeração
2,0	Cogeração	Cogeração	Cogeração

5.3 Otimização do Sistema - Método 2 (MILP)

O método de programação linear inteira mista pode ser entendido como um caso especifico da programação linear, onde parte das variáveis são inteiras. Esse método utiliza como base as equações desenvolvidas no capítulo 4. A otimização é composta basicamente por duas etapas, que são:

1. Proposição de um Sistema Genérico: Utiliza o mesmo conceito mostrado da seção 5.2;
2. Programação Linear Inteira Mista: Nesta etapa é aplicado o método MILP, com as potências nominais dos equipamentos assumindo valores inteiros e utilizando o modelo matemático desenvolvido no capítulo 4;

Aplicando o Método 2 (MILP), observou-se na Tabela 26 que as soluções ótimas são qualitativamente e quantitativamente diferentes das encontradas no Método 1. Qualitativamente, as diferenças ocorrem para β = 1,1, onde o Método 1 propõe um sistema convencional com gerador de energia (Figura 24.b) e o Método 2 propõe um sistema de cogeração com rede pública (Figura 24.c).

Quantitativamente, todos os sistemas ótimos são distintos entre os dois métodos. Por exemplo, para um aumento de 20% (β = 1,2) da tarifa de eletricidade, o Método 2 preferiu comprar um gerador de energia de 2500 kW, uma caldeira de recuperação de 2000 kW, um *chiller* de absorção de 1200 kW e um *chiller* de compressão de 2100 kW (mesmo com esses equipamentos indisponíveis nos conjuntos da Tabela 23). A

Tabela 26 – Potências escolhidas pelo método 2 em função do fator (β)

	Método 2 (MILP)						
β	EG	PG	RB	EB	GB	AC	CC
0,4	3020	0	0	0	0	0	3300
0,5	3020	0	0	0	0	0	3300
0,6	3020	0	0	0	0	0	3300
0,7	1920	1100	0	0	0	0	3300
0,8	320	2700	0	0	0	0	3300
0,9	320	2700	0	0	0	0	3300
1,0	20	3000	0	0	0	0	3300
1,1	59	2500	2000	0	0	1200	2100
1,2	59	2500	2000	0	0	1200	2100
1,3	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,4	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,5	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,6	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,7	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,8	0	2600	2000	0	0	1200	2100
1,9	0	2600	2000	0	0	1200	2100
2,0	0	2600	2000	0	0	1200	2100

Tabela 27 – Modo de operação do sistema para os diversos valores de β para o método 2

	Shopping fechado	Shopping aberto	
FATOR	FP	FP	HP
0,4	Rede	Rede	Rede
0,5	Rede	Rede	Rede
0,6	Rede	Rede	Rede
0,7	Rede	Rede	Rede + Motor
0,8	Rede	Rede	Rede + Motor
0,9	Rede	Rede	Rede + Motor
1,0	Rede	Rede	Rede + Motor
1,1	Rede	Cogeração + Rede	Cogeração + Rede
1,2	Rede	Cogeração + Rede	Cogeração + Rede
1,3	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,4	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,5	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,6	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,7	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,8	Cogeração	Cogeração	Cogeração
1,9	Cogeração	Cogeração	Cogeração
2,0	Cogeração	Cogeração	Cogeração

Tabela 27 mostra os modos de operação encontrados para os sistemas ótimos com a aplicação do MILP, que diferem do Método 1 (BE/PL) a partir do fator 0,9, mostrando também que existem diferenças operacionais para os resultados encontrados.

Usando o Método 2, o tempo total de processamento foi de 31 segundos, uma redução de 610 vezes (0,2% do tempo usado pelo Método 1). Os valores obtidos para VPL foram teoricamente melhores do que os do Método 1, porém o Método 2 escolheu

equipamentos que não estão disponíveis.

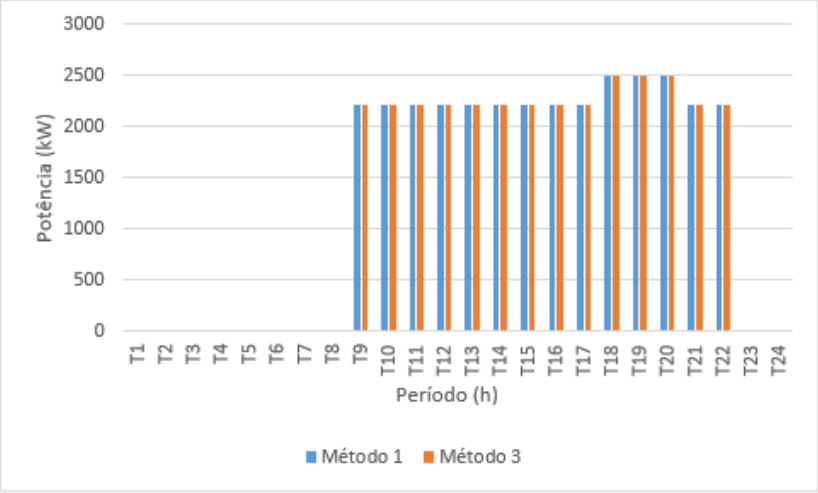
5.4 Otimização do Sistema - Método 3 (BS/PL)

Esse novo método combina diversos aspectos do método híbrido original e do MILP, buscando agregar a aproximação com a realidade do primeiro com a velocidade do segundo. O método é descrito em 5 passos, que são:

1. Proposição de um Sistema Genérico;
2. Pré-Seleção;
3. Programação Linear Mista;
4. Busca Seletiva;
5. Programação Linear;

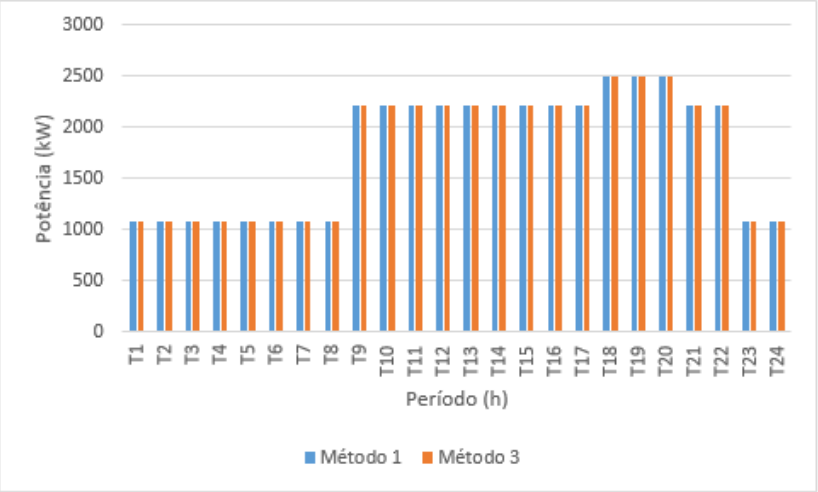
Ao se aplicar o Método 3, utiliza-se o MILP agora apenas para diminuir o número de permutações realizadas na busca exaustiva. Os resultados obtidos com a aplicação do Método 3, tanto no aspecto físico como financeiro, foram semelhantes aos encontrados no Método 1 (embora não haja garantia que isso ocorrerá em outras situações). O modo operacional também se manteve o mesmo, como pode ser observado nas Figuras 25 e 26, que mostram a operação do motogerador em um dia de semana, com os fatores 1,2 e 1,3, respectivamente.

Figura 25 – Funcionamento do motor em função do tempo para $\beta = 1,2$ para os Métodos 1 e 3



Nesse método, o tempo de otimização foi de 802 segundos, reduzindo em 95,8% o tempo de otimização, muito pelo número de permutações necessárias ter

Figura 26 – Funcionamento do motor em função do tempo para $\beta = 1,3$ para os Métodos 1 e 3



sido reduzido para 1088 (=2.2.2.2.2.2.17), correspondendo a 4,4% do número de permutações utilizadas no método híbrido. Os valores de VPL encontrados foram idênticos aos do método híbrido (BE/PL), mesmo com várias opções de potência suprimidas. Esse método tem vantagem em relação ao MILP puro por escolher apenas opções comerciais.

5.5 Comparação entre os Métodos

5.5.1 Comparação Financeira

A Tabela 28 apresenta os resultados financeiros de VPL para cada método, onde variou-se o fator β que multiplica a tarifa da eletricidade. Pode-se observar que, para todos os valores de β, a aplicação do Método 2 resultou em valores maiores (melhores) de VPL, no entanto, como mostrado na Tabela 23, com equipamentos não disponíveis para compra. Os métodos 1 e 3 resultaram nos mesmos valores de VPL. A Tabela 29 mostra os valores de investimento e operação para os 3 métodos, onde é possível observar a diferenças operacionais (VE diferentes) e de investimento inicial dos equipamentos. Nota-se também que existem diferentes modos de operação para o mesmo valor de β, já que o valores operacionais são diferentes. Esse ponto será descrito com mais detalhes na subseção de comparação técnica.

A Tabela 30 apresenta a diferença percentual do VPL do Método 2 (MILP) em relação aos Métodos 1 e 3. A maior diferença ocorre para $\beta = 1,1$ (8,43%). Existem dois intervalos de erro. Em primeiro lugar, quando ambos os métodos resultam em um sistema convencional (puro ou com um gerador de energia, $0,4 \leq \beta \leq 1,0$), o

Tabela 28 – VPL em função do β

β	Método 1	Método 2	Método 3
0,4	$26,985,100.00	$27,020,300.00	$26,985,100.00
0,5	$24,781,300.00	$24,816,600.00	$24,781,300.00
0,6	$22,577,500.00	$22,612,800.00	$22,577,500.00
0,7	$20,448,200.00	$20,501,900.00	$20,448,200.00
0,8	$18,521,400.00	$18,588,900.00	$18,521,400.00
0,9	$16,766,500.00	$16,833,800.00	$16,766,500.00
1,0	$15,037,300.00	$15,084,500.00	$15,037,300.00
1,1	$13,308,100.00	$14,429,400.00	$13,308,100.00
1,2	$12,888,200.00	$13,972,200.00	$12,888,200.00
1,3	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,4	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,5	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,6	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,7	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,8	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
1,9	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00
2,0	$12,825,000.00	$13,895,300.00	$12,825,000.00

erro máximo é de 0,31%. Quando um ou ambos os sistemas propõem um sistema de cogeração (puro ou com a rede pública, 1,1 $\leq \beta \leq$ 2,0), então o erro pula para 8%. Esse salto ocorre na segunda faixa de valores (1,1 $\leq \beta \leq$ 2,0) porque o custo de investimento dos equipamentos escolhidos nos Métodos 1 e 3 é maior que o do Método 2.

A Tabela 31 resume os principais resultados da comparação entre os métodos 1, 2 e 3, tanto em precisão do VPL como em termos de tempo de otimização, onde a aplicação do Método 3 resultou em um bom compromisso entre esses dois pontos.

Tabela 29 – Investimentos iniciais e valores operacionais dos 3 métodos

	Método 1			Método 2			Método 3		
Fator (β)	**VPL**	**VE**	**VI**	**VPL**	**VE**	**VI**	**VPL**	**VE**	**VI**
0,4	$26.985.100,00	$29.346.800,00	$ -2.361.750,00	$ 27.020.300,00	$ 29.346.800,00	$ -2.326.500,00	$26.985.100,00	$29.346.800,00	$ -2.361.750,00
0,5	$24.781.300,00	$27.143.100,00	$ -2.361.750,00	$ 24.816.600,00	$ 27.143.100,00	$ -2.326.500,00	$24.781.300,00	$27.143.100,00	$ -2.361.750,00
0,6	$22.577.500,00	$24.939.300,00	$ -2.361.750,00	$ 22.612.800,00	$ 24.939.300,00	$ -2.326.500,00	$22.577.500,00	$24.939.300,00	$ -2.361.750,00
0,7	$20.448.200,00	$23.342.700,00	$ -2.894.520,00	$ 20.501.900,00	$ 23.282.700,00	$ -2.780.800,00	$20.448.200,00	$23.342.700,00	$ -2.894.520,00
0,8	$18.521.400,00	$21.610.000,00	$ -3.088.630,00	$ 18.588.900,00	$ 22.030.500,00	$ -3.441.600,00	$18.521.400,00	$21.610.000,00	$ -3.088.630,00
0,9	$16.766.500,00	$20.387.900,00	$ -3.621.400,00	$ 16.833.800,00	$ 20.275.400,00	$ -3.441.600,00	$ 16.766.500,00	$ 20.387.900,00	$ -3.621.400,00
1	$15.037.300,00	$18.658.700,00	$ -3.621.400,00	$ 15.084.500,00	$ 18.650.000,00	$ -3.565.500,00	$ 15.037.300,00	$ 18.658.700,00	$ -3.621.400,00
1,1	$13.308.100,00	$16.929.500,00	$ -3.621.400,00	$ 14.429.400,00	$ 18.418.000,00	$ -3.988.600,00	$ 13.308.100,00	$ 16.929.500,00	$ -3.621.400,00
1,2	$12.888.200,00	$17.739.600,00	$ -4.851.390,00	$ 13.972.200,00	$ 17.960.800,00	$ -3.988.600,00	$ 12.888.200,00	$ 17.739.600,00	$ -4.851.390,00
1,3	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,4	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,5	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,6	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,7	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,8	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
1,9	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00
2	$12.825.000,00	$17.676.400,00	$ -4.851.390,00	$ 13.895.300,00	$ 17.925.200,00	$ -4.029.900,00	$ 12.825.000,00	$ 17.676.400,00	$ -4.851.390,00

Tabela 30 – Diferença percentual do VPL do método 2 em relação aos métodos 1 e 3

β	Método 2
0,4	0,13%
0,5	0,14%
0,6	0,16%
0,7	0,26%
0,8	0,36%
0,9	0,40%
1,0	0,31%
1,1	8,43%
1,2	8,41%
1,3	8,35%
1,4	8,35%
1,5	8,35%
1,6	8,35%
1,7	8,35%
1,8	8,35%
1,9	8,35%
2,0	8,35%

Tabela 31 – Comparação entre os Métodos 1, 2 e 3

Métrica	Método 1	Método 2	Método 3
Máxima imprecisão	Referência	8,43%	0,00%
Tempo de processamento (s)	18.923	31	802

5.5.2 Comparação Técnica

A Tabela 32 mostra as potências nominais escolhidas pelos métodos para cada fator β. Nos três métodos houve a redução gradativa na utilização da rede elétrica com o aumento da tarifa de energia elétrica, com uma redução mais acentuada no Método 2, ocasionada principalmente pela liberdade na escolha nas potências nominais. Outro ponto interessante é que para as tarifas estudadas, o Método 2 não utilizou nenhuma vez a caldeira a gás, pois custo inicial desse equipamento é elevado. Um ponto importante pode ser observado na Tabela 32, no ponto onde (β) é 1,1, é que caso a opção de escolha de potência pelo Método 3 fosse apenas a potência imediatamente superior a encontrada no MILP, a solução não seria a mesma do Método 1, evidenciando o aumento da precisão quando as opções de potência inferior e superior estão disponíveis na busca seletiva.

As diferenças entre os métodos também acontecem no âmbito operacional, com os sistemas ótimos apresentando diferentes estratégias de funcionamento. A Figura 27 mostra a energia gerada pelo motogerador em função do tempo para um dia de

Tabela 32 – Potências escolhidas pelos métodos em função do fator (β)

	Método 1 (BE/PL)							Método 2 (MILP)							Método 3 (BS/PL)						
β	**EG**	**PG**	**RB**	**EB**	**GB**	**AC**	**CC**	**EG**	**PG**	**RB**	**EB**	**GB**	**AC**	**CC**	**EG**	**PG**	**RB**	**EB**	**GB**	**AC**	**CC**
0,4	3020	0	0	0	0	0	3350	3020	0	0	0	0	0	3300	3020	0	0	0	0	0	3350
0,5	3020	0	0	0	0	0	3350	3020	0	0	0	0	0	3300	3020	0	0	0	0	0	3350
0,6	3020	0	0	0	0	0	3350	3020	0	0	0	0	0	3300	3020	0	0	0	0	0	3350
0,7	1730	1290	0	0	0	0	3350	1920	1100	0	0	0	0	3300	1730	1290	0	0	0	0	3350
0,8	1260	1760	0	0	0	0	3350	320	2700	0	0	0	0	3300	1260	1760	0	0	0	0	3350
0,9	2684	3050	0	0	0	0	3350	320	2700	0	0	0	0	3300	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,0	2684	3050	0	0	0	0	3350	20	3000	0	0	0	0	3300	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,1	2684	3050	0	0	0	0	3350	59	2500	2000	0	0	1200	2100	2684	3050	0	0	0	0	3350
1,2	1085	3050	2790	0	2790	1675	1675	59	2500	2000	0	0	1200	2100	1085	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,3	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,4	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,5	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,6	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,7	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,8	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
1,9	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675
2,0	0	3050	2790	0	2790	1675	1675	0	2600	2000	0	0	1200	2100	0	3050	2790	0	2790	1675	1675

semana, onde é possível identificar que o motogerador funciona apenas quando o shopping center está aberto. Já no caso dos Métodos 1 e 3, a Figura 28 mostra que motogerador opera apenas no horário de ponta, mostrando que além da diferença física, os sistemas também assumem modos de operação diferentes.

Figura 27 – Funcionamento do motor em função do tempo para β =1,1 com a aplicação do Método 2

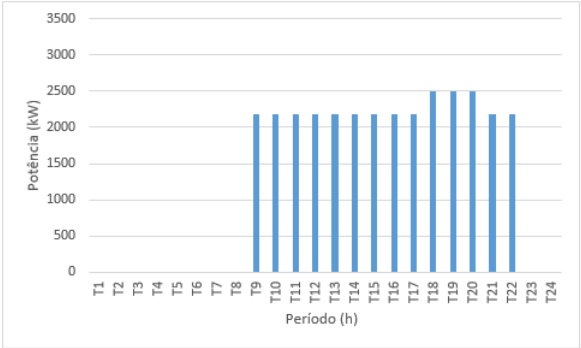
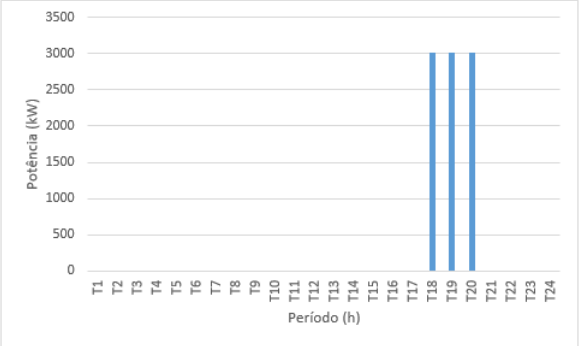


Figura 28 – Funcionamento do motor em função do tempo para $\beta = 1{,}1$ com a aplicação dos Métodos 1 e 3



6 CONCLUSÕES

A otimização de sistemas térmicos é um processo complexo, pois devido a quantidade de variáveis envolvidas, existem diversas soluções com diferentes modos de operação possíveis. Para resolver esses problemas de otimização, os trabalhos anteriores do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) da UFPE, utilizavam um método híbrido de programação linear e busca exaustiva. Pelo fato de algumas das variáveis serem discretas e não uniformemente espaçadas, durante a otimização era necessário realizar permutações com diversas potencias de diversos equipamentos, deixando o processo extremamente lento a medida que o número de potências e/ou equipamentos foi aumentando.

Diante desse cenário, foram implementadas diversas modificações no programa em C++ utilizado por Hornsby (2014) para utilização do MILP. Devido as potências comerciais não serem uniformemente espaçadas, verificou-se que o MILP apresentava valores otimizados de potência que não tinham correspondência com essas potências comerciais. Então, logo em seguida, foi proposto um novo método de otimização híbrido baseado no MILP, que poderia trabalhar com essas potências não uniformemente espaçadas e com uma maior velocidade. Foram realizados 3 estudos de caso com métodos diferentes, todos variando a tarifa de energia elétrica de acordo com o fator (β) de 0,4 a 2,0.

O primeiro estudo de caso utilizou o método híbrido original para realizar o estudo paramétrico da tarifa de energia elétrica. O sistema se mostrou sensível a variação da tarifa, pois com o aumento de 20% o sistema já sofre uma reconfiguração onde prefere comprar um sistema de cogeração ao invés de usar o sistema convencional. Ao se aumentar a tarifa em 30%, o sistema preferiu atender toda a demanda elétrica através de um motogerador. Para realizar esse estudo, o método teve que realizar 24786 permutações e levou 18923,3 segundos (5,25 horas) para completar a tarefa.

O segundo estudo de caso utilizou o MILP para realizar o estudo paramétrico. As potências dos equipamentos selecionadas pelo método foram bem diferentes das do método híbrido, muito por conta da liberdade que o método de escolha, não dependendo de potências especificas pré-selecionadas. Para aumentos iguais ou superiores a 20% na tarifa elétrica o sistema preferiu não adquirir a caldeira a gás, utilizando a caldeira de recuperação para acionar o *chiller* de absorção. O método levou 31 segundos para realizar a otimização e obteve valores de VPL superiores aos encontrados no método híbrido, porém, as potências encontradas pelo método não correspondiam a potências reais.

O último estudo de caso utilizou o novo método híbrido baseado no MILP para realizar o estudo paramétrico. As potências encontradas em todo o estudo paramétrico foram as mesmas do híbrido original, porém, o método precisou realizar apenas 1088 permutações, cerca de 4,4% do número de permutações total do método original. Esse método conseguiu reduzir o tempo de otimização para 802 segundos, o que representa uma redução de 95,8% se comparado ao estudo de caso 1.

O objetivo principal do trabalho era reduzir o tempo de otimização do sistema térmico. Com a redução de 95,8% do tempo de otimização e mantendo os resultados encontrados no método híbrido original, o novo método proposto correspondeu de forma satisfatória.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de sistemas térmicos que utilizem formas de energia renovável, como células fotovoltaicas e energia eólica. Esses equipamentos vem sendo cada vez mais implementados em sistemas DER (*distributed energy resources*) devido a sua baixa emissão de CO_2 e pelo seu potencial na redução de custos. A implementação dessas fontes geralmente está atrelada a sistemas de armazenamento de energia, seja na forma térmica ou elétrica, podendo gerar bons resultados.

Outra sugestão seria implementar a tarifa de crédito de carbono e analisar o impacto dessa tarifa na escolha dos sistemas térmicos. A tarifa do crédito de carbono é dada em US\$/tCO_2e, mostrando que a cada tonelada de CO_2 equivalente retirada da atmosfera ou deixada de ser emitida traz um certo valor monetário associado.

Sugere-se também o estudo da otimização por faixa, já que hoje a otimização é feita de forma pontual para um fator especifico, e não para uma faixa de valores.

Outra sugestão é realizar um estudo de otimização robusta, buscando não apenas o melhor resultado possível para um determinado cenário, mas também uma solução que atenda com menor risco uma faixa mais ampla das variáveis sujeitas a incertezas e a estocasticidade.

Também sugere-se implementar no código as curvas de performance dos equipamentos, visto que a eficiência dos equipamentos não é constante. Essas curvas geralmente são obtidas através de pesquisa na literatura, simulação em softwares e informações fornecidas pelos fabricantes.

Outra sugestão para trabalhos futuros é realizar a comparação com os resultados obtidos através da simulação em softwares comerciais, como o HOMER *Energy*, em termos de VPL e velocidade da otimização.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. R. et al. Análise técnico-econômica da cogeração com termoacumulação aplicada ao setor terciário. *9 Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*, 2009. Citado na página 61.

BIEZMA, M.; CRISTOBAL, J. S. Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 583–588, 2006. ' Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

BISCHI, A. et al. A detailed milp optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. *Energy*, Elsevier, v. 74, p. 12–26, 2014. ' Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.

CADORE, G. Análise dos índices financeiros e econômicos de uma importadora de máquinas, para possível investimento. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Citado na página 21.

CELPE. *Tabela de Tarifas - Superintendência de Regulação - SRE*. 2015. Citado na página 60.

DELGADO, M. A.; RIDER, M. J. Algoritmo branch and bound não linear para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2014. Citado na página 25.

FAZLOLLAHI, S.; MARÉCHAL, F. Multi-objective, multi-period optimization of biomass conversion technologies using evolutionary algorithms and mixed integer linear programming (milp). *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 50, n. 2, p. 1504–1513, 2013. Citado na página 34.

FREITAS, L. A. Estudo energético e econômico de sistemas térmicos de fornecimento de eletricidade e água gelada: o caso dos shopping centers de pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco, 2016. ' Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 60.

FREITAS, L. A.; MAGNANI, F. S.; HORNSBY, E. M. Robustness of electricity and chilled water supply systems subject to change technical and economic. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 15, n. 5, p. 908–915, 2017. ' Citado 3 vezes nas páginas 26, 46 e 47.

GUERRA, M. R. *Otimização de Sistemas de Cogeração Flexíveis Usando Método de Programação Linear*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2011. ' Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.

HENNING, D.; AMIRI, S.; HOLMGREN, K. Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local swedish utility. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 175, n. 2, p. 1224–1247, 2006. ' Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

HORNSBY, E. M. *Adaptive systems for the generation of electricity, steam and chilled water: optimization considering financial and environmental metrics*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2014. ’ Citado 13 vezes nas páginas 17, 18, 19, 26, 37, 38, 48, 50, 52, 61, 62, 64 e 76.

LIU, M.; SHI, Y.; FANG, F. Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 35, p. 1–22, 2014. ’ Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

LOPES, J. C. Manual de tarifação da energia elétrica. *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica-Procel*, 2002. Citado na página 60.

LOZANO, M. A.; RAMOS, J. C.; SERRA, L. M. Cost optimization of the design of chcp (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy*, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 794–805, 2010. Citado na página 17.

MACEDO, N. G. L. d. *Avaliação econômica da substituição de um chiller de compressão por um chiller de absorção alimentado por coletores solares com base em medições em um prédio da chesf em Recife*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Citado na página 61.

MACÊDO, N. Guilherme Leal de. Avaliação econômica da substituição de um chiller de compressão por um chiller de absorção alimentado por coletores solares com base em medições em um prédio da chesf em recife. Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Citado na página 19.

MACULAN, N.; FAMPA, M. H. C. Otimização linear. *Editora Universidade de Brasilia: Brasilia*, 2006. Citado na página 23.

MOTTA, R. R. da; CALÔBA, G. M. *Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais*. [S.l.]: Atlas, 2002. Citado na página 21.

OLIVEIRA, G. Lacerda Batista de. Estudo de viabilidade técnica e financeira de usinas termelétricas a várias pressões, temperaturas e potências. Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado na página 19.

REN, H.; GAO, W. A milp model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems. *Applied Energy*, Elsevier, v. 87, n. 3, p. 1001–1014, 2010. Citado na página 33.

SILVA, P. P. d. Estudo da habilidade de sistemas de cogeração em suportar variações financeiras. Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Citado na página 19.

SMITH, A. D.; MAGO, P. J. Effects of load-following operational methods on combined heat and power system efficiency. *Applied Energy*, Elsevier, v. 115, p. 337–351, 2014. Citado na página 28.

SÖDERMAN, J.; PETTERSSON, F. Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied thermal engineering*, Elsevier, v. 26, n. 13, p. 1400–1408, 2006. Citado na página 18.

SOUZA, M. F. P. d. *Estudo do impacto da tarifa do crédito de carbono sobre a otimização de sistemas térmicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017. ’ Citado 3 vezes nas páginas 19, 34 e 59.

STYRELSEN. Generation of electricity and district heating, energy storage and energy carrier generation and conversion. *Denmark: energinet. dk, Energi Styrelsen*, 2012. Citado na página 61.

TEIXEIRA, M. de S.; JÚNIOR, S. de O. Thermoeconomic evaluation of cogeneration systems for a chemical plant. *International Journal of Thermodynamics*, v. 4, n. 3, p. 157–163, 2001. Citado na página 61.

VALE, L. A. d. *Análise econômica de sistemas térmicos adaptativos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017. ' Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

VÖGELIN, P. et al. Heuristic approach for the economic optimisation of combined heat and power (chp) plants: Operating strategy, heat storage and power. *Energy*, Elsevier, 2017. ' Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

WANG, J.; YANG, Y. A hybrid operating strategy of combined cooling, heating and power system for multiple demands considering domestic hot water preferentially: A case study. *Energy*, Elsevier, v. 122, p. 444–457, 2017. ' Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

WILLIS, H. L. *Power distribution planning reference book*. [S.l.]: CRC press, 2004. Citado na página 61.

WU, D.; WANG, R. Combined cooling, heating and power: a review. *progress in energy and combustion science*, Elsevier, v. 32, n. 5, p. 459–495, 2006. Citado na página 61.

WU, Q. et al. Multi-criteria assessment of combined cooling, heating and power systems located in different regions in japan. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 73, n. 1, p. 660–670, 2014. Citado na página 32.

XIE, Y. et al. Performance of cogeneration system incorporating gas engine driven heat pump. In: *Challenges of Power Engineering and Environment*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 61–63. Citado na página 61.

YANG, Y.; ZHANG, S.; XIAO, Y. An milp (mixed integer linear programming) model for optimal design of district-scale distributed energy resource systems. *Energy*, Elsevier, v. 90, p. 1901–1915, 2015. Citado na página 33.

ZHANG, J.; CHO, H.; KNIZLEY, A. Evaluation of financial incentives for combined heat and power (chp) systems in us regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 59, p. 738–762, 2016. ' Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.

APÊNDICE A – **TABELAS DE DADOS UTILIZADAS NO *EXCEL***

Tabela 1 - Dados de potencia e equipamento retirados do arquivo em C++

Dados				
Símbolo	Descrição	Valor		Unidade
α	Parâmetro (Pode variar de 0 a 1)	1		
POT_MT	Potência nominal do motor	2252		kW
POT_RD	Potência nominal da rede	0		kW
POT_CC	Potência nominal do chiller de compressão	3050		kW
POT_CA	Potência nominal do chiller de absorção	0		kW
POT_CG	Potência nominal da caldeira a gás	734		kW
POT_CR	Potência nominal da caldeira de recuperação	2317		kW
POT_CE	Potência nominal da caldeira elétrica	0		kW
		Hora de Ponta	Fora de Ponta	
DEM	Demanda de energia elétrica	1079	1079	kW
DEM_VAP	Demanda de vapor	3050	3050	kW
DEM_AG	Demanda de água gelada	3050	3050	kW
x_1	Potência de entrada na caldeira à gás	917,071	917,071	kW
x_2	Potência de entrada no motor	6434,29	6434,29	kW
x_3	Potência consumida da rede elétrica	0,0769231	0,0769231	kW
x_4	Potência restante após conversão no motor	2895,43	2895,43	kW
x_5	Potência vendida internamente	0	0	kW
x_6	Potência de entrada na caldeira de recuperação	2895,43	2895,43	kW
x_7	Potência convertida em energia elétrica no motor	2252,08	2252,08	kW
x_8	Potência de entrada da caldeira elétrica	0	0	kW
x_9	Potência de entrada do chiller de compressão	1173,08	1173,08	kW
x_10	Potência direcionada para suprir a demanda elétrica	1079	1079	kW
x_11	Potência vendida externamente	0	0	kW
x_12	Demanda de energia elétrica	1079	1079	kW
x_13	Potência convertida pela caldeira à gás	733,657	733,657	kW
x_14	Potência convertida pela caldeira de recuperação	2316,34	2316,34	kW
x_15	Potência convertida pela caldeira elétrica	0	0	kW
x_16	Demanda de vapor	3050	3050	kW
x_17	Potência de entrada do chiller de absorção	0	0	kW
x_18	Potência convertida pelo chiller de absorção	0	0	kW
x_19	Potência convertida pelo chiller de compressão	3050	3050	kW
eta_mot,ter	Rendimento térmico do motogerador	0,45		N/A
eta_mot,el	Rendimento elétrico do motogerador	0,35		N/A
eta_cg	Rendimento da caldeira à gás	0,8		N/A
eta_cr	Rendimento da caldeira de recuperação	0,8		N/A
eta_ce	Rendimento da caldeira elétrica	0,9		N/A
COP_ca	COP do chiller de absorção	0,5		N/A
COP_cc	COP do chiller de compressão	2,6		N/A

Tabela 2 - Dados financeiros e ambientais retirados do arquivo em C++

Símbolo	Descrição	Valor		Unidade
		Financeiro	Ambiental	
j	Taxa de juros	0,0094	0,0094	N/A
n	Número de meses de operação	240	240	meses
tar_comb	Tarifa do combustível (gás natural)	0,77	0,000183	US$/m^3 e kgCO2/kWh
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	45500	45500	kJ/m^3
k_venda,ext	Preço de venda externa de energia elétrica	0,104	0	US$/kWh
k_venda,int	Preço de venda interna de energia elétrica	0,325	0	US$/kWh
k_venda,vap	Preço de venda interna de vapor	0,123	0	US$/kWh
k_vapor,ag	Preço de venda interna de água gelada	0,154	0	US$/kWh
k_inv,CC	Custo de investimento monetário do chiller de compressão	460	0,0000314	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,CA	Custo de investimento monetário do chiller de absorção	640	0,0000436	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,CR	Custo de investimento monetário da caldeira de recuperação	440	0,0000255	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,CE	Custo de investimento monetário da caldeira elétrica	290	0,0000168	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,CG	Custo de investimento monetário da caldeira à gás	250	0,0000144	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,MT	Custo de investimento monetário do grupo motogerador	2400	0,0001388	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,FL	Custo de investimento monetário na linha de combustível	0	0	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,EG	Custo de investimento monetário na rede elétrica	0	0	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,EP	Custo de investimento na linha de distribuição de energia elétrica	0	0	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_inv,SM	Custo de investimento na linha de distribuição de vapor	0	0	US$/kW e 10^(-6)US$/kW
k_ee,fp	Tarifa de consumo de energia elétrica no horário fora de ponta	0,18	0,000396	US$/kWh e kgCO2/kWh
k_ee,hp	Tarifa de consumo de energia elétrica no horário de ponta	0,18	0,000396	US$/kWh e kgCO2/kWh
k_dem,fp	Tarifa de demanda de energia elétrica financeira no horário fora de ponta	0	0	US$/kWh e kgCO2/kWh
k_dem,hp	Tarifa de demanda de energia elétrica financeira no horário de ponta	0	0	US$/kWh e kgCO2/kWh
k_comb	Tarifa do combustível (gás natural) por kWh	0,060923077	0,000183	US$/kWh e kgCO2/kWh
μ	Valor presente financeiro	95,11930528	240	N/A
ND	Número de dias úteis no mês	21	21	dias/mês
NF	Número de dias de final de semana no mês	9	9	dias/mês
NHP	Quantidade de horas de ponta por dia	3	3	h/dia
H	Horas por dia	24	24	h/dia