



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELA FRANÇA PRADO DE SOUZA

**ESTUDO DO IMPACTO DA TARIFA DO CRÉDITO DE CARBONO SOBRE A
OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS**

RECIFE

2017

MARCELA FRANÇA PRADO DE SOUZA

**ESTUDO DO IMPACTO DA TARIFA DO CRÉDITO DE CARBONO SOBRE A
OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos e Sistemas Térmicos

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S729e Souza, Marcela França Prado de.
Estudo do impacto da tarifa do crédito de carbono sobre a otimização de sistemas térmicos / Marcela França Prado de Souza . – 2015.
89f., il., figs., gráfs., tabs.

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

1. Engenharia Mecânica. 2. Otimização de sistemas.
3. Programação linear. 4. Métrica financeira. 5. Métrica ambiental.
6. Mecanismo de desenvolvimento limpo. 7. Crédito de Carbono.
I. Magnani, Fábio Santana (Orientador). II. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2015/ 243

23 de fevereiro de 2017

“ESTUDO DO IMPACTO DA TARIFA DO CRÉDITO DE CARBONO SOBRE A
OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS”

MARCELA FRANÇA PRADO DE 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. ALVARO ANTONIO OCHOA VILLA (IFPE)

Prof. Dr. MÁRIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão de bolsa durante o período de realização do mestrado.

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 orientação, apoio e direcionamento durante todo o tempo. Aos colegas do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos pela ajuda mútua e engajamento.

Aos meus familiares e amigos por todo incentivo e apoio.

RESUMO

Sistemas de trigeriação são sistemas capazes de suprir demandas de água gelada, vapor e energia elétrica, eles são comumente empregados em indústrias e edifícios comerciais. De modo geral, a otimização de sistemas de trigeriação é um processo que se baseia no estudo numérico do sistema e verifica suas várias possibilidades de melhoramento. Esse melhoramento depende diretamente da métrica que será otimizada. Otimizações considerando a métrica financeira são as mais frequentes, mas, os esforços para diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera têm direcionado a otimização de sistemas focando também na métrica ambiental. Isso porque, devido a ações antrópicas, predominantemente pelos setores industriais e de energia, a emissão de GEE e sua concentração na atmosfera têm aumentado bastante, provocando diversas alterações danosas ao clima. O problema é que as métricas financeiras e ambientais parecem irreconciliáveis, pois, geralmente, os sistemas mais rentáveis são os que mais poluem. Diante disso, nessa dissertação em um primeiro estudo avaliou-se a combinação linear entre a métrica financeira e a ambiental com a variação percentual da relevância de uma métrica em relação a outra e seu impacto na escolha do sistema otimizado. Um segundo estudo avaliou o impacto da tarifa do crédito de carbono na escolha do sistema otimizado, este parâmetro tem por definição cunho tanto financeiro quanto ambiental. A programação linear foi o método escolhido para otimizar o sistema térmico e a função objetivo foi o valor presente líquido tanto financeiro quanto ambiental. No primeiro estudo foi possível concluir que para um projeto de sistema térmico que vise uma baixa emissão de poluentes atrelado a uma receita razoável, o peso para métrica financeira pode variar entre 0 a 70% sem que haja aumento na emissão de dióxido de carbono. O segundo estudo mostrou que a tarifa do crédito de carbono deve ser maior que US\$32 para provocar mudanças físicas no sistema, a partir desse valor a operação do sistema otimizado provocou gradativa queda na emissão e aumento na receita, a medida que a tarifa aumentava. A partir de US\$128 não foram mais observadas mudanças na configuração do sistema. Além dos ganhos ambientais, a venda de créditos de carbono trouxe retornos financeiros atrativos para as indústrias que se adequam aos critérios do Mecanismo de Desenvolvimento limpo - MDL e recebem autorização para entrar no comércio de crédito de carbono.

Palavras-chave: Otimização de sistemas. Programação linear. Métrica financeira. Métrica ambiental. Mecanismo de desenvolvimento limpo. Crédito de carbono.

ABSTRACT

Trigeneration systems are systems capable of supplying demands for ice water, steam and electric power, they are commonly employed in industries and commercial buildings. In general, the optimization of trigeneration systems is a process that is based on the numerical study of the system and verifies its various possibilities of improvement. This improvement depends directly on the metric that will be optimized. Optimizations considering the financial metrics are the most frequent, but efforts to reduce the emission of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere have directed the optimization of systems focusing also on the environmental metric. This is because, due to anthropic actions, predominantly by the industrial and energy sectors, the emission of GHG and its concentration in the atmosphere have increased a lot, causing several damaging changes to the climate. The problem is that the financial and environmental metrics seem irreconcilable, because generally the most profitable systems are the ones that pollute the most. Therefore, in this dissection in a first study the linear combination between the financial and the environmental metrics was evaluated, with the percentage variation of the relevance of one metric in relation to another and its impact on the choice of the optimized system. A second study evaluated the impact of the carbon credit tariff on the choice of the optimized system, this parameter is by definition both financial and environmental. Linear programming was the method chosen to optimize the thermal system and the objective function was the net present value, both financial and environmental. In the first study it was possible to conclude that for a thermal system project aiming at a low emission of pollutants coupled to a reasonable income, the weight for financial metrics can range from 0 to 70% without increasing carbon dioxide emissions. The second study showed that the carbon credit rate should be higher than US \$ 32 to cause physical changes in the system, from this value the operation of the optimized system caused a gradual decrease in the emission and increase in revenue, as the tariff increased. From \$ 128 no more changes were observed in the system configuration. In addition to environmental gains, the sale of carbon credits has brought attractive financial returns to industries that meet the criteria of the Clean Development Mechanism (CDM) and are allowed to enter the carbon credit trade.

Keywords: Optimization of systems. Linear programming. Financial metrics. Environmental metrics. Clean development mechanism. Carbon credits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configuração do sistema do caso simples. (a) apenas motor; (b) apenas rede; (c) combinação rede motor.	39
Figura 2: Sistema genérico.	44
Figura 3: Configuração do sistema ao longo da curva otimizada.....	45
Figura 4: Configuração do sistema usado para o estabelecimento da linha de base.	52
Figura 5: Variação do VPL financeiro e ambiental em função do α	57
Figura 6: Variação do VPL financeiro e da emissão de CO2 em toneladas em função do α	58
Figura 7: Operação do sistema otimizado para α igual a 0,7 no tempo 19.....	60
Figura 8: Operação do sistema otimizado para α igual a 0,8 no tempo 19.....	61
Figura 9: Comparação entre o modo de operação dos equipamentos α igual a 0,9 e 1.....	62
Figura 10: configuração do sistema base e sua operação para o tempo 19.	64
Figura 11: Variação do VPL financeiro e ambiental em função do preço do crédito de carbono.	65
Figura 12: Variação do VPL financeiro e da emissão de CO2 em função do preço do crédito de carbono.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de referência em função do tempo para o Potencial de Aquecimento Global dos GEEs: CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O.	22
Tabela 2: Tipo de otimização realizada em função de α e γ	42
Tabela 3: Dados para o gás natural.....	53
Tabela 4: Dados para o óleo diesel.....	53
Tabela 5: Dados das tarifas elétricas de consumo e demanda no horário de ponta e fora de ponta.	54
Tabela 6: Emissão de CO ₂ para a produção de energia elétrica em função da matriz energética.	54
Tabela 7: Custo de investimento financeiro e ambiental dos equipamentos.....	54
Tabela 8: Rendimento dos equipamentos.....	55
Tabela 9: Preço de venda interna e externa de energia, água gelada e vapor.....	56
Tabela 10: Potência nominal dos equipamentos utilizadas.....	56
Tabela 11: Dados referentes a operação do sistema e os respectivos VPLs em função do α	59
Tabela 12: emissão do sistema escolhido como base, em função da fonte de energia.....	63
Tabela 13: Dados referentes a operação do sistema e os respectivos VPLs em função da tarifa de crédito de carbono, γ	66

LISTA DE SIGLAS

AND - Autoridade Nacional Designada;

CE - Comércio de Emissões;

CERs - Certificados de Emissões Reduzidas;

COPs - Conferências das Partes;

GEE - Gases de Efeito Estufa;

IC - Implementação Conjunta;

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;

LOST - Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos das Bicicletas e Motocicletas;

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;

ONU - Organização das Nações Unidas;

PAG - Potencial de Aquecimento Global;

PIB - Produto Interno Bruto;

PPE - Programa de Planejamento Energético;

PO - Pesquisa Operacional;

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco;

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro;

UNFCCC - Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas;

VPL - Valor Presente Líquido.

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Fator que combina a métrica financeira e ambiental;

γ - Tarifa de crédito de carbono;

μ - Fator do valor presente;

μ_{fin} - Fator do valor presente financeiro;

μ_{amb} - Fator do valor presente ambiental;

D_{amb} - Diferença entre a emissão de CO₂ da linha base e o sistema;

i - Taxa de juros;

$k_{inv, equip}$ - Custo de aquisição do equipamento;

k_{amb} - Tarifa ambiental;

k_{fin} - Tarifa financeira;

k_{demHP} - Tarifa de demanda no horário de ponta;

k_{demFP} - Tarifa de demanda no horário fora de ponta;

LB - Emissão de CO₂ da linha de base;

n - Número de meses;

N_{equip} - Potência nominal do equipamento;

tCO_2e - Tonelada de CO₂ equivalente;

VPL - Valor presente líquido;

VI - Valor inicial;

VM - Valor mensal;

VPL_{fin} - Valor presente líquido financeiro;

VPL_{amb} - Valor presente líquido ambiental;

$VPL_{combinado}$ - Valor presente líquido combinado;

VI_{amb} - Valor inicial ambiental;

VM_{amb} - Valor mensal ambiental;

VI_{fin} - Valor inicial financeiro;

VM_{fin} - Valor mensal financeiro;

VPL_{CC} - Valor presente líquido relacionada a venda de créditos de carbono;

x_j - Potência de operação do equipamento em função do tempo e da posição no sistema;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivo geral.....	17
1.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	Estrutura da dissertação.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Cenário global das mudanças climáticas.....	20
2.2	Evolução da conferência das partes e acordos internacionais.....	23
2.3	Mecanismo de desenvolvimento limpo e o comércio de crédito de carbono.....	29
2.4	Impactos financeiros associados as mudanças no clima.....	32
2.5	Otimização de sistemas através de métricas financeiras e ambientais.....	33
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
3.1	Pesquisa operacional e programação linear.....	35
3.2	Valor presente líquido.....	37
3.3	Monitoramento ambiental.....	38
3.4	Otimização de sistemas: caso simples.....	38
4	MÉTODOS, MODELAGEM E DADOS.....	41
4.1	Métrica.....	41
4.2	Processo de otimização do sistema.....	43
4.2.1	Proposição do sistema térmico.....	44

4.2.2	Modelagem.....	46
4.3	Estudo de caso 1: impacto da variação do alpha sobre a otimização do sistema..	49
4.4	Estudo de caso 2: impacto da variação do gama sobre a otimização do sistema..	50
4.4.1	Estabelecendo a linha de base.....	51
4.5	Dados.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1	Estudo de caso 1: impacto da variação do alpha na otimização de sistemas térmicos.....	57
5.2	Estudo de caso 2: impacto da variação do gama na otimização de sistemas térmicos.....	63
5.2.1	Estabelecendo a linha de base.....	63
5.2.2	Variação da tarifa do crédito de carbono.....	64
6	CONCLUSÕES.....	69
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	APÊNDICE.....	78

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm sido motivo de grande preocupação nas últimas décadas. As perspectivas de alteração no clima, em um futuro próximo, intensificadas pelo modo de vida humano, chamam cada vez mais a atenção de cientistas do clima, economistas, governos e da sociedade como um todo. Estes, em conjunto, precisam encontrar caminhos para amenizar os impactos ambientais e também os financeiros presentes e futuros decorrentes dessas mudanças. As negociações internacionais sobre as mudanças do clima começaram na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, que ocorreu no Rio de Janeiro, em 1992 (LUCENA; SCHAEFFER, 2012; RIBAS, 2013), onde teve início a discussão da formulação da Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (UNFCCC) (LUCENA; SCHAEFFER, 2012). O objetivo da Convenção foi estabilizar a concentração de gases de efeito estufa (GEE) em um patamar onde não ocorram interferências perigosas sobre o sistema climático. A Convenção também atua compilando e divulgando informações sobre as emissões de GEE e políticas nacionais e internacionais; lançando estratégias para a mitigação e cooperando na proposição de soluções no que diz respeito a adaptação aos impactos das mudanças climáticas (LUCENA; SCHAEFFER, 2012).

O setor industrial e de energia são os setores das atividades humanas que mais contribuem para as emissões de GEE no mundo. O valor das emissões globais atuais desses dois setores de um único ano atingiram as maiores contribuições para o aquecimento global ao longo de uma escala de tempo de 100 anos, de acordo com a Contribuição do Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC (IPCC, 2015; STOCKER, 2013).

No Brasil, desde 1990, o setor de mudança do uso da terra é o que mais contribui para as emissões de GEE do país. Entretanto, estudo realizado por La Rovere et al. (2013) estima que, caso o Brasil consiga atingir as metas voluntárias de redução de emissões com as quais se comprometeu com a UNFCCC até 2020 – sobretudo através da redução do desmatamento – as emissões de GEE relativas ao setor de energia irão assumir essa liderança, o que fará com que este setor se torne o maior responsável por emissões no país.

O país terá de enfrentar, após 2020, um desafio semelhante ao que os países desenvolvidos enfrentam hoje: desenvolvimento econômico com baixa emissão de GEE relacionados à energia. Assim, caso políticas e medidas adicionais de mitigação não sejam implementadas, diversos

autores afirmam que as emissões de GEE do país tenderão a crescer novamente no período entre 2020 e 2030 (DUBASH et al., 2013; GURGEL; PALTSEV, 2014; LA ROVERE et al., 2013, 2014; VOGT-SCHILB; HALLEGATTE; GOVELLO, 2015).

Através do setor público, do setor privado e sociedade civil, o Brasil, tem assumido um compromisso com a promoção de uma trajetória de desenvolvimento sustentável. O engajamento do Brasil nas questões climáticas (através da sua participação nas conferências internacionais, além da proposição de soluções e elaboração de planos e relatórios que agregam valor a comunidade científica e dão direcionamento aos diversos setores da economia de como se posicionar em relação a esse tema) tem dado ao Brasil uma posição de destaque frente a comunidade internacional para discutir esse tema.

O Brasil vive um momento ímpar e diferenciado do resto do mundo, já que a dependência de fontes externas de energia é particularmente pequena e sua energia é considerada limpa. Isso abre janelas de oportunidades para investidores em mecanismos energéticos sustentáveis, como é o caso do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL que será bem abordado ao longo do texto. Assim é necessário continuar nesse caminho de proposição de políticas públicas e verificação do seu real impacto para que o Brasil possa se desenvolver de maneira sustentável e para que consiga cumprir com as metas voluntárias divulgadas a UNFCCC.

Para isso, faz-se necessário o melhoramento contínuo dos processos produtivos e o investimento na otimização dos processos já em operação; assim como, a implementação de novos projetos que levam em conta em sua fase de construção fatores não apenas financeiras, mas também ambientais.

O processo de otimização de sistemas depende diretamente de que parâmetro ou métrica será analisada e otimizada. A otimização financeira é a mais comum de ser demandada, pois, geralmente, traz a minimização dos custos e/ou a maximização das receitas do processo. Porém, nos dias atuais a otimização ambiental (sendo geralmente monitorada pela redução na emissão de dióxido de carbono, CO₂, em relação a um caso base) também tem assumido sua posição de destaque. Como um sistema pode ser lucrativo e ao mesmo tempo causar um menor dano ambiental? Essas métricas são compatíveis? Caminham em sentidos iguais ou não? É possível um caminho razoável para ambos? Isso é que será respondido através dos estudos de caso que se seguem.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) tem estudado a otimização de sistemas a mais de uma década. Inicialmente apenas a otimização considerando a métrica financeira era realizada (FREITAS, 2016; GUERRA, 2011; LACERDA et al., 2009; MACEDO, 2007; MAGNANI et al., 2013; MAGNANI; MELO, 2009; MELO, 2004; OLIVEIRA, 2011; PETRÔNIO, 2012; ROSA; PRIMO, 2003), a partir de 2014 alguns estudos foram realizados levando em consideração também a métrica ambiental (HORNSBY, 2014; HORNSBY et al., 2017). Assim, esta dissertação faz parte de um processo de evolução do tema e vem para contribuir ainda mais com os estudos da otimização financeira e ambiental de sistemas térmicos.

Uma das grandes contribuições desta dissertação para a evolução dos estudos de otimização de sistemas térmicos realizado pelo LOST foi a inclusão da tarifa do crédito de carbono no cálculo do VPL.

Foram realizados dois estudos nesta dissertação. O primeiro se baseia em agrupar a métrica financeira e a ambiental através da combinação linear entre elas, por meio de um fator que será designado como α ; variando o peso dado a uma métrica em detrimento da outra e verificando o que isso provoca no sistema otimizado. O segundo estudo insere na métrica financeira uma variável que tem por definição cunho tanto financeiro quanto ambiental, a chamada tarifa de crédito de carbono, que será designada como γ . Essa tarifa será variada numa certa faixa de valores e o impacto sobre a escolha do sistema otimizado provocados por essa variação será analisado.

1.1 Objetivo geral

Otimizar um sistema adaptativo de geração e distribuição de energia que supra a demanda de potência requerida e que proporcione a melhor condição financeira e ambiental segundo critérios específicos.

1.2 Objetivos específicos

- Proposição de um sistema térmico de trigerção adaptativo e sua demanda de potência (energia elétrica, vapor e água gelada);
- Pré-seleção dos possíveis equipamentos que irão suprir essa demanda;
- Escolha da métrica que será utilizada para a otimização;
- Elaboração do modelo matemático que represente o sistema e suas variáveis de decisão do ponto de vista financeiro e ambiental;
- Levantamento dos dados e variáveis financeiras e ambientais necessárias para o modelo;
- Proposição de cenários para o sistema de distribuição através da permutação dos equipamentos e suas respectivas potências pré-selecionadas;
- Otimização do sistema térmico considerando as métricas financeira e ambiental, através de uma combinação simples e por meio de um fator chamado alpha (α) – Estudo de caso 1;
- Otimização do sistema térmico considerando a inclusão do crédito de carbono, γ , e acompanhamento do impacto financeiro e ambiental – Estudo de caso 2;
- Indicação do (s) cenário (s) que gera (m) melhores resultados do ponto de vista financeiro e ambiental para cada variação paramétrica.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

O capítulo 1 introduz o tema mostrando os desafios dos diversos setores da economia de melhorar os seus processos visando não apenas a redução de custos e aumento da receita, mas também um menor impacto ao meio ambiente. Este capítulo mostra qual será a contribuição desta pesquisa no que diz respeito às melhorias nos setores industriais e de produção de energia decorrentes da implementação do processo de otimização dos sistemas considerando métricas financeiras e ambientais.

O capítulo 2 se inicia mostrando um panorama geral sobre as mudanças climáticas, apresenta também um histórico dos avanços políticos das questões da mudança do clima e a evolução das Conferências das Partes (COPs) até a mais recente, ocorrida no final do ano de 2016 no Marrocos. Apresenta também os mecanismos de flexibilização estabelecidos pelo Protocolo de Kyoto, focando em um único subtópico o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o comércio de crédito de carbono, que muito tem a contribuir para o desenvolvimento sustentável do Brasil. Os dois últimos subtópicos apresentam os impactos financeiros decorrentes das mudanças climáticas e os recentes estudos que tratam sobre a a otimização de sistemas considerando as métricas financeiras e ambientais.

O capítulo 3 traz uma fundamentação teórica dos principais conceitos necessários para um melhor entendimento da escolha das funções pertinentes as métricas financeiras e ambientais e do processo de modelagem do sistema. O último subtópico deste capítulo traz o processo simplificado da otimização de um caso simples para exemplificar o processo que será realizado no sistema mais complexo.

A metodologia e a modelagem utilizada no estudo são abordadas no capítulo 4. Este capítulo está dividido em 5 tópicos, onde o primeiro mostra a métrica que será otimizada, o segundo fala sobre os passos necessários para a otimização, incluindo também a escolha do sistema que será objeto de estudo da dissertação. Os dois subsequentes mostram as peculiaridades dos estudos de caso 1 e 2, e o último tópico traz todos os dados necessários para o estudo numérico.

O capítulo 5 está dividido em duas seções. A primeira traz todos os resultados obtidos no estudo de caso 1, onde ocorre a variação do fator α e a segunda seção aborda os resultados do estudo de caso 2, onde ocorre a variação da tarifa de créditos de carbono (γ).

Chega-se então ao capítulo 6 e 7 que abordam as conclusões obtidas com os estudos e as sugestões para trabalhos futuros, respectivamente. Por fim, são apresentados as referências e o apêndice.

Uma lista de variáveis com seus respectivos símbolos e descrição foi incluída no início da dissertação e poderá ser acessada sempre que necessário para um melhor acompanhamento do passo a passo da elaboração das equações principais apresentadas ao longo do texto. Foi incluída também uma lista de siglas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cenário global das mudanças climáticas

Ao analisar os dados de temperatura e de padrões de chuva do último século, cientistas perceberam que o clima está mudando rapidamente em várias partes da Terra. Dados compilados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) – grupo de pesquisadores internacionais vinculados à Organização das Nações Unidas (ONU) – revelam que, de acordo com diversas universidades e institutos de pesquisa do mundo, há um aumento gradual da temperatura média da terra (IPCC, 2014, 2015; ROCHA et al., 2014).

Mas não apenas o aumento médio da temperatura da Terra tem sido observado. Alterações nos padrões de chuva também têm transformado várias regiões do planeta. Lugares onde chovia pouco agora são atingidos por inundações. Secas têm surpreendido regiões onde o regime de chuvas era bastante regular. Outros sinais da mudança do clima na Terra são observados pelo aumento na frequência de eventos climáticos extremos como furacões, tornados e ciclones. Esses fenômenos foram observados, inclusive, pelas empresas de seguros que alegam pagar indenizações de seguro relativos a esses eventos em uma constância maior do que há 50 anos (ROCHA et al., 2014).

Esses são apenas os sinais diretos da mudança do clima. Conforme a temperatura média da Terra sobe, o ritmo de descongelamento das calotas polares e do gelo no cume das montanhas é maior. E para onde vai toda essa água? Para os oceanos, provocando o aumento do nível do mar, o que também já está ocorrendo desde o século passado (ROCHA et al., 2014). Dados coletados por satélites de pesquisa comprovam que o nível do mar está subindo, podendo afetar seriamente as regiões costeiras no futuro resultando, por exemplo, no desaparecimento de centenas de ilhas no Oceano Pacífico.

Uma das questões principais é saber o que tem causado e intensificado essas mudanças. Sabe-se que o Efeito Estufa é um fenômeno natural que mantém a temperatura da terra nos níveis adequados a vida, pois ao ser atingida pelos raios solares, a superfície da terra esquenta e irradia calor de volta ao espaço, alguns gases na atmosfera terrestre como o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e, principalmente, o dióxido de carbono (CO₂) têm a capacidade de absorver calor e ao absorverem

esquentam a atmosfera da terra, se esses gases não tivessem essa propriedade a terra teria uma temperatura 33°C menor do que a atual e o planeta seria congelado.

Esses gases que possibilitam o efeito estufa são conhecidos como gases de efeito estufa (GEE). Os principais GEE e que estão no Protocolo de Kyoto são o CO₂, o CH₄, o N₂O, os PFCs, os HFCs e o SF₆, sendo a queima de combustíveis fósseis a principal fonte de emissão de CO₂, a modificação e uso da terra a principal fonte de emissão de CH₄ e o uso agrícola de fertilizantes químicos a principal fonte de emissão de N₂O. Durante a COP17 (Conferência das Partes da ONU sobre mudanças climáticas), um novo GEE foi incluído na lista dos gases de Kyoto, NF₃, o trifluoreto de nitrogênio (ROCHA ET AL., 2014; UNFCCC, 2010).

Cada um dos GEEs possui um Potencial de Aquecimento Global (PAG) específico. PAG é o fator que define o impacto radiativo de uma unidade de massa de um dado GEE em relação a uma unidade de massa de dióxido de carbono em um dado intervalo de tempo (GÓES, 2015). O valor do PAG de um GEE depende diretamente dos elementos químicos que o compõem. Cada ligação química entre os elementos possui um potencial maior ou menor de absorver radiação infravermelha, dando a cada tipo de gás um PAG maior ou menor. Assim, a emissão total de GEE é oficialmente consolidada em uma unidade de medida específica, CO₂ equivalente, expressa por CO₂e.

O PAG baseia-se na relativa importância dos GEE, em relação ao dióxido de carbono, cujo potencial é definido como 1. O PAG é calculado sobre um intervalo de tempo definido e este precisa ser declarado para a comparação. A Tabela 1 apresenta os diferentes valores de PAG de acordo com a seu horizonte temporal. Essa variável é criticada por parte da academia por não representar de forma adequada a contribuição relativa dos diferentes GEEs à mudança do clima. Seja medida em termos de aumento na temperatura média da superfície terrestre, aumento do nível do mar ou em qualquer estatística de elementos meteorológicos relacionados aos danos, a mudança do clima não é proporcional à energia, à exceção de períodos de tempo muito curtos. Assim, é dito que o uso do PAG propiciaria políticas de mitigação inadequadas. Além disso, o seu uso enfatizaria sobremaneira, e de modo errôneo, a importância de GEEs de curto tempo de permanência na atmosfera, especialmente a do metano (GÓES, 2015; MCTI, 2015)

Tabela 1: Valores de referência em função do tempo para o Potencial de Aquecimento Global dos GEEs: CO₂, CH₄ e N₂O.

	PAG			
	10 anos	20 anos	100 anos	500 anos
CO₂	1	1	1	1
CH₄	21	72	25	7,6
N₂O	310	289	298	153

Por mais que o CO₂ seja o gás que possui menor PAG ele é o mais importante e um dos principais gases monitorados pelas indústrias, pois, é o gás liberado como maior intensidade através da queima de combustíveis fósseis e o desmatamento em todo o mundo. Esses combustíveis liberam quantidades enormes de CO₂ para a atmosfera quando são queimados para a geração de energia. Antes de ser liberado pela queima, esse carbono encontrava-se retido no subsolo ou nas árvores, ao extrair e utilizar os combustíveis fósseis, o carbono que estava isolado da atmosfera é lançado nela. Assim, eleva-se a concentração de CO₂ contribuindo para o aumento do efeito estufa e seus impactos negativos como os mencionados nos parágrafos iniciais desse tópico.

Para se ter uma ideia de como os combustíveis derivados de petróleo e do carvão são ricos em CO₂, a queima de 1L de óleo diesel libera 2,7 kg de CO₂. Isto é tão significativo que, apenas de 2013 para 2014, o modo de vida humano gerou a emissão de 32 bilhões de toneladas desse gás (ROCHA ET AL., 2014; SILVA, 2015)

O Brasil está entre os maiores emissores mundiais de GEE ao lado da Indonésia e Rússia e atrás dos Estados Unidos, China e União Europeia. Atualmente, as emissões brasileiras representam cerca de 5% das emissões globais. A estimativa das emissões do Brasil é de 1,25 bilhão de tonelada de carbono equivalente. Cerca de 60% destas é resultado de atividades de uso do solo como o desmatamento e as queimadas, sendo que 67% destes ocorrem na Amazônia e 22%, no Cerrado.

Para o Brasil reduzir drasticamente as suas emissões deve frear o desmatamento ilegal na Amazônia e recuperar a Mata Atlântica, além de diminuir gradativamente a sua dependência de combustíveis fósseis e investir em tecnologias e geração de energia mais limpas.

2.2 Evolução da conferência das partes e acordos internacionais

A primeira Conferência oficial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento aconteceu em junho de 1992 no Rio de Janeiro, a Rio 92, onde 175 países e a União Europeia assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) e tornaram-se Partes da Convenção, reconhecendo a mudança do clima como uma preocupação comum da humanidade e propondo-se a elaborar uma estratégia global para proteger o sistema climático para as gerações presentes e futuras.

A Convenção do Clima, ou Convenção como será tratada ao longo deste trabalho, entrou em vigor em 21 de março de 1994, quando assinada por 188 países. Esta estabeleceu o compromisso de redução de emissões de GEE por parte dos países industrializados. A partir de 1995 deu-se início a realização das COPs, Conferências das Partes, que são reuniões anuais para regulamentação, discussão e implementação das ações necessárias para concretizar a UNFCCC (ALBUQUERQUE, 2012).

As COPs são grandes reuniões em nível mundial com abordagem voltada para uma série de temas referentes ao desenvolvimento do planeta, como meio ambiente, educação e economia. A COP é responsável por manter e tentar garantir os esforços internacionais da mudança climática, sua junta revisa a implementação da Convenção e examina o compromisso dos países as luzes do objetivo da Convenção. Uma das tarefas principais da COP é revisar as Comunicações Nacionais e a submissão dos inventários de GEE. De posse dessas informações a COP analisa os efeitos das medidas tomadas pelas Partes e o progresso em atingir o respectivo objetivo da Convenção (DIETZSCH et al., 2009)

As COPs são realizadas anualmente até hoje e suas principais metas das COPs são:

- Mobilizar os governos nacionais, autarquias e organizações da sociedade civil para tomarem medidas sobre um problema mundial importante;
- Estabelecer normas e diretrizes internacionais para as políticas nacionais;
- Servir de fórum onde podem ser debatidas novas propostas e novos consensos podem ser procurados;

- Provocar um processo no qual os governos possam assumir compromissos e passar a informar a ONU, regularmente, em relação a situação dessas metas prioritárias.

O público da conferência inclui delegados de governos, observadores de organizações e jornalistas. A COP 1 foi realizada em Berlim, na Alemanha, em agosto de 1995, iniciando o processo de negociação de metas e prazos específicos para a redução de GEE para os países desenvolvidos, nela também é sugerida a constituição de um Protocolo internacional. Em 1996, a COP 2, aconteceu em Genebra, na Suíça, onde ficou acordado as obrigações legais das metas de redução por meio da Declaração de Genebra (DIETZSCH et al., 2009). Em 1997, com a crescente pressão pública em relação ao meio ambiente, vários governos aceitaram adotar, durante a COP3 no Japão, o Protocolo de Kyoto.

Um Protocolo é um acordo internacional independente, porém ligado a um tratado anterior. Isso significa que o Protocolo compartilha as preocupações e princípios dispostos na Convenção do clima, a partir dos quais acrescenta novos compromissos, que são mais fortes e muito mais complexos e detalhados do que os da Convenção (ARAUJO, 2008).

O Protocolo de Kyoto foi então elaborado em 1997, com a missão de determinar metas específicas para os países desenvolvidos e estabilizar a concentração de seis dos grandes causadores do efeito estufa, a saber, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hexafluoreto de enxofre (SF_6), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs) (ALBUQUERQUE, 2012).

Depois de um período longo de discussão e pela necessidade de adesão de um número significativo de países, o Protocolo de Kyoto entrou em vigor em 2005. Para entrar em vigor, o Protocolo precisou ser ratificado por pelo menos 55 Estados Partes da Convenção, englobando países que contabilizaram no total pelo menos 55% das emissões totais de CO_2 em 1990. Devido à não ratificação pelo maior emissor mundial de gases de efeito estufa, os Estados Unidos, quase todos os outros países desenvolvidos precisaram ratificar o Protocolo. Isto ocorreu porque somente os Estados Unidos são responsáveis por aproximadamente 36% das emissões totais dos países desenvolvidos listados no Anexo 1 (essa classificação será explicada mais adiante) do Protocolo de Kyoto, tomando por base o ano de 1990. A negação da ratificação pelos Estados Unidos gerou protestos mundo afora (ALBUQUERQUE, 2012).

O Protocolo de Kyoto teve por objetivo reduzir as emissões de GEEs de países do Anexo I em 5,2% dos níveis de emissão em relação ao ano de 1990 (ALBUQUERQUE, 2012; DIETZSCH et al., 2009). Essa redução foi avaliada durante os anos de 2008 a 2012, esse período refere-se ao primeiro período de compromisso de Kyoto. O Protocolo se fundamenta basicamente em dois princípios: o “Princípio da Precaução” e o “Princípio da Responsabilidade Comum, porém Diferenciada” (ARAUJO, 2008; DIETZSCH et al., 2009).

O “Princípio da Precaução”, semelhante ao princípio básico do Direito Ambiental, declara que a falta de plena certeza científica não deve ser usada como argumento para se postergar medidas quando houver ameaça de dano sério ou irreversível ao meio ambiente e sociedade. E o “Princípio da Responsabilidade Comum, porém Diferenciada” atribui a liderança pelo movimento de mudança do clima aos países desenvolvidos que emitem GEE tempos antes dos países em desenvolvimento começarem a emitir. Esse princípio leva em conta a contribuição histórica de cada país (ARAUJO, 2008; DIETZSCH et al., 2009).

Assim, o Protocolo de Kyoto, dividiu os países (partes de Kyoto) em dois grupos:

- Anexo I - países mais industrializados, e conseqüentemente grandes emissores históricos de GEE e,
- Não-Anexo I - países menos industrializados que para atender às suas necessidades básicas de desenvolvimento, precisam aumentar a sua oferta energética e, potencialmente, suas emissões de GEE.

Para o cumprimento das metas do Protocolo de Kyoto foram desenvolvidos três mecanismos de flexibilização para ajudar os países Anexo I a atingirem suas metas de redução de emissões de GEEs e minimizarem os custos dessa redução. Já para os países não Anexo I, ou seja, em desenvolvimento, esses mecanismos flexíveis tratam-se de uma oportunidade de aporte de capital para investimento em projetos que reduzam as emissões de GEE e fomentem o desenvolvimento sustentável (SOUZA, 2005).

Os três mecanismos de flexibilização são: comércio de emissões (CE), implementação conjunta (IC), e mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Os mecanismos apresentam grandes diferenças quanto aos participantes e quanto à dinâmica. Os dois primeiros são restritos à

participação de países pertencentes ao Anexo I e apenas o MDL permite a participação dos países em desenvolvimento. Com relação à forma de operacionalização dos instrumentos, o CE baseia-se na comercialização de permissão de emissão, enquanto os outros dois instrumentos baseiam-se na elaboração de projetos que levem a uma redução de emissão (ARAÚJO, 2008; DIETZSCH et al., 2009; ROCHA ET AL., 2014; SOUZA, 2005).

O CE permite apenas a participação de países anexo I, pois lida com elementos relacionados às metas de redução de emissão. Como países não-anexo I não possuem metas, não podem participar desse mecanismo. Os países possuem uma grande heterogeneidade em relação às suas condições políticas, modernidade do parque industrial, hábitos da sociedade ou dependência de combustíveis fósseis, assim há países com maior facilidade de redução de emissão e outros com maior dificuldade. Em função disso, permitiu-se que os países possam negociar os seus direitos de emitir. Ou seja, um país A que consegue reduzir suas emissões a um custo baixo, possui um incentivo para reduzir o máximo possível, podendo então comercializar a diferença entre sua redução de emissão e sua meta para países que apresentam uma maior dificuldade de redução de emissão, ou seja, um maior custo. Essa permissão que o país A possui foi definido no Protocolo de Kyoto como unidade de quantidade atribuída, também conhecida no mercado como *Allowances*, ou seja, “permissões”, pois se tratam da comercialização do direito de emitir quantidades de GEE (ARAÚJO, 2008; DIETZSCH et al., 2009; ROCHA ET AL., 2014; SOUZA, 2005).

O conceito do IC e MDL baseia-se no fato de que são necessários investimentos para reduzir as emissões de GEEs. Como se trata de um problema global, independentemente de onde o investimento é feito (no país de origem ou em qualquer outro país), projetos que levem a uma redução de emissão geram um “crédito” referente a essa redução (ARAÚJO, 2008)

Países do Anexo I podem investir nesses projetos, assim como poderiam investir em uma ação interna, utilizando esses “créditos” como uma das formas para se atingir a sua meta de redução de emissão. O benefício obtido pelo desenvolvedor de projeto com o mercado de carbono é exatamente a ajuda necessária para viabilizar o empreendimento, pois, na maioria dos casos, sem os benefícios e receitas adicionais provenientes deste “crédito”, o empreendimento não seria viável, e não aconteceria (ARAÚJO, 2008; SOUZA, 2005). Como dito, a diferença entre eles é que o IC ocorre entre países do anexo I e o MDL é implantado em um país não anexo I e o investimento feito por um país anexo I. Assim, o MDL é uma oportunidade para que vários países em

desenvolvimento, como o Brasil, possam lucrar com os mercados globais de créditos de carbono e receber investimentos financeiros dos países desenvolvidos.

Assim, desde a COP 4, ocorrida em Buenos Aires em 1998, até a COP 10, as conferências foram direcionadas para regulamentar o Protocolo de Kyoto. A COP 11 foi a primeira Conferência das Partes após a entrada em vigor do Protocolo e começou-se a discutir as questões das emissões oriundas do desmatamento tropical e as mudanças no uso da terra (ALBUQUERQUE, 2012).

Durante a COP 12, realizada no Quênia, representantes de 189 nações assumem o compromisso de revisar o Protocolo de Kyoto e as regras são estipuladas para o financiamento de projetos de adaptação em países pobres. O governo brasileiro propõe oficialmente a criação de um mecanismo que promova efetivamente a redução de emissões de gases de efeito estufa, em países em desenvolvimento, oriunda do desmatamento. Entre as COPs 13 e 16 foram continuamente discutidas as novas metas para os países do Anexo I e a inclusão de metas de redução de emissões oriundas de desmatamento em países em desenvolvimento, pós-2012 (segundo período do Protocolo de Kyoto).

Durante a COP17, em dezembro de 2011, houve a negociação sobre o segundo período de compromisso de Kyoto que se iniciou no dia 1 de janeiro de 2013 e termina no dia 31 de dezembro de 2020, esta data final foi definida durante a COP 18 em Doha, capital do Catar. Ainda durante a COP17, duas outras decisões foram tomadas. A primeira delas foi de que os três mecanismos de flexibilização, comércio de emissões, implementação conjunta e mecanismo de desenvolvimento limpo continuam válidos para o segundo compromisso de Kyoto e a segunda delas foi a inclusão de um outro GEE ao Protocolo, o nitro fluoreto (NF₃) (ALBUQUERQUE, 2012). Vale ressaltar que Canadá, Japão e Rússia não farão parte deste segundo período de compromisso.

Além das duas semanas oficiais de conferência, foi necessário quase um dia a mais para que os negociadores conseguissem concluir algumas decisões importantes da pauta de negociações da CO 19, em Varsóvia, temas como a compensação por perdas e danos, financiamento climático e pagamento por emissão reduzida a partir de esforço de combate ao desmatamento e à degradação florestal foram intensamente discutidos. Na COP 20, em Lima no Peru, foi possível definir a base para o novo acordo climático que seria negociado no ano seguinte durante a COP 21, este acordo substituirá o Protocolo de Kyoto em 2020 (ESTADÃO, 2014; OC, 2013).

A COP21, realizada em Paris entre os dias 30 de novembro e 12 de dezembro de 2015, foi a conferência com o maior número de países, houve a participação de chefes de estado (ou representantes) de 195 países, tendo como principal objetivo firmar um acordo (que ficou conhecido como Acordo de Paris) entre as nações participantes, voltado para a redução das emissões dos gases do efeito estufa, este acordo deverá entrar em vigor a partir de 2020, quando o segundo período do Protocolo de Kyoto se encerra. Cada país apresentou medidas práticas e metas para reduzir a emissão de carbono, nos próximos anos. Estas metas devem ser revistas, a partir de 2018, a cada cinco anos (G1 NATUREZA, 2015c).

Um dos aspectos que interessam bastante o Brasil foi a ampliação do financiamento para os países em desenvolvimento. Os países do G20 (grupo dos 20 países mais ricos do mundo) se comprometeram a ajudar financeiramente as nações em desenvolvimento com US\$ 100 bilhões por ano (a partir de 2020), para que estas possam desenvolver sistemas e projetos para redução da emissão de gases de efeito estufa (GLOBO NEWS, 2015).

Como participante da COP 21 e do Acordo de Paris, o Brasil assumiu o compromisso de reduzir em 37% as emissões de GEE até 2025, ampliando a redução para 43% até o ano de 2030. Outro compromisso assumido foi de ampliar a participação de fontes de energia renováveis (eólica e solar, por exemplo) na matriz energética (G1 NATUREZA, 2015c)..

Resumindo, o resultado principal da COP 21 foi a aprovação do Acordo de Paris que estabelece que é preciso reduzir o aquecimento global para que, até o ano de 2100, a temperatura média do planeta tenha um aumento inferior a 2°C, ampliando esforços para um objetivo mais nobre de 1,5°C. Ficou estabelecido também que o Acordo de Paris deve ser revisto a cada 5 anos, para saber a que passo estão as metas voluntárias de cada país, a partir de 2020 e o repasse de US\$100 bilhões dos países ricos para os países em desenvolvimento. O comprometimento desses países é fundamental, mas a pavimentação do caminho a ser percorrido para alcance desse destino é de extrema importância, para que de fato esse acordo saia do papel e cause o impacto positivo pertinente (GLOBO NEWS, 2015).

Assim, COP 21 foi uma conferência para firmar o compromisso com o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono, o que está em jogo não é apenas a redução de emissão, mas também a adaptação as mudanças climáticas que já estão ocorrendo. Por isso, a transferência de tecnologia

para países de menor desenvolvimento e o financiamento de projetos que viabilizem a implementação de uma economia de baixo carbono é extremamente importante (GLOBO NEWS, 2015).

Diversos setores estão sendo instigados pelo governo a fazer a sua parte e reduzir a emissão e os impactos ao meio ambiente. Ver-se que o Brasil tem potencial de redução e oportunidades de ação em todos os setores da economia. Na indústria a otimização de seus sistemas de produção e o aumento da eficiência energética implica diretamente na redução de custo e de emissão; na área de transporte o melhoramento do transporte público e o aumento da eficiência dos motores de modo geral implicará em reduções significativas na emissão de gases de efeito estufa nesse setor.

Por fim, a COP22 aconteceu recentemente em Marrakesh no Marrocos entre os dias 7 e 18 de novembro de 2016, porém, sem avanços expressivos, mas tendo reafirmado a sua determinação em aplicar o Acordo de Paris, apesar da incerteza criada pela eleição do cético do clima, Donald Trump, que durante a sua campanha prometeu cancelar a participação dos Estados Unidos no Acordo de Paris como uma medida protecionista para o crescimento econômico do país e classificou a existência das mudanças climáticas como uma “farsa” (GINATUREZA, 2016a, 2016b).

2.3 Mecanismo de desenvolvimento limpo e o comércio de crédito de carbono

Como foi visto no tópico anterior, o Protocolo de Kyoto determinava que os países criassem programas de redução da poluição dentro de seus territórios e cumprissem com as metas acordadas, mas, atendendo a reivindicações, para não comprometer as economias desses países, ficou definido que, caso fosse impossível atingir as metas estabelecidas os países poderiam comprar créditos de outras nações que tenham projetos voltados para a mitigação de gases de efeito estufa (DIETZSCH et al., 2009).

O Protocolo de Kyoto criou então três mecanismos de flexibilização. Dois desses eram de exclusiva aplicação entre países desenvolvidos, a Implementação Conjunta (IC) e o Comércio de Emissões (CE), o terceiro é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL que envolve países desenvolvidos e em desenvolvimento, abrindo oportunidades para o Brasil.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo é praticamente fruto de uma proposta brasileira do estabelecimento de um “Fundo de Desenvolvimento Limpo”. Este fundo seria alimentado por recursos oriundos de taxas que seriam impostas aos países do Anexo I que não cumprissem com as suas metas de redução. Os recursos arrecadados seriam utilizados para apoiar programas de adaptação e transferência de tecnologia nos países em desenvolvimento. Após negociações entre países do Anexo I e o Brasil, o texto foi modificado e ganhou características da Implementação Conjunta, se convertendo no que é o MDL (DIETZSCH et al., 2009).

Esse mecanismo interessa muito ao Brasil, pois permite a certificação de projetos de redução de emissões brasileiras e a posterior venda desses certificados aos países desenvolvidos, esse mecanismo de flexibilização foi estruturado no Princípio do Poluidor Pagador, onde se prevê a cobrança de uma taxa daquele que polui e a destinação dos recursos provenientes dessa taxa para alguma iniciativa de correção daquela poluição. De forma simplista, está dentro do “direito de poluir” contanto que se pague por isso (ARAUJO, 2008).

Como os GEEs se misturam na atmosfera independente de fronteiras políticas e geográficas, do ponto de vista ambiental não importa se a redução de emissões ocorre neste ou naquele país em específico, o que importa é que haja uma redução de emissões global.

Para as empresas brasileiras, o MDL se constitui numa grande oportunidade para o desenvolvimento de programas de redução de emissão, principalmente no que se refira a energias renováveis e a projetos de aumento de eficiência energética. Há uma série de critérios para reconhecimento desses projetos, como por exemplo, estarem alinhados às premissas de desenvolvimento sustentável do país hospedeiro, definidos por uma Autoridade Nacional Designada (AND). No caso do Brasil, tal autoridade é a Comissão Interministerial de Mudança do Clima. Somente após a aprovação pela comissão é que o projeto pode ser submetido à ONU para avaliação e registro (ARAUJO, 2008; DIETZSCH et al., 2009).

Ao se enquadrar nos critérios estabelecidos pelo MDL, as organizações credenciadas (ANDs) poderão conceder certificados de emissões reduzidas (CERs) que correspondem a reduções decorrentes da implementação de um projeto sem a existência do qual as emissões seriam mais elevadas (ARAUJO, 2008). Por exemplo, uma termoelétrica na Amazônia consome cerca de 50 mil toneladas de carbono. Se substituir óleo diesel por gás natural, as emissões cairão pela metade

e ela deixará de emitir 25 mil toneladas de carbono por ano. Essa redução poderá ser vendida sob forma de certificados a uma firma holandesa, que a usará para cumprir suas metas de redução.

Em 2008, Araujo, fez um levantamento da posição do Brasil em relação a outros países também em desenvolvimento na quantidade de projetos de MDL, ele verificou que o Brasil ocupava a terceira posição em termos de reduções de emissões, sendo responsável por reduzir cerca de 276 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), o que corresponde a 6% do total mundial. A China ocupava o primeiro lugar com 2,1 bilhões de tCO₂e (49% do total mundial), seguida pela Índia representando 23% das reduções, com pouco mais de 1 bilhão de tCO₂e.

No início do primeiro prazo de cumprimento do Protocolo, em 2008, já se contabilizavam 3.101 projetos que se encontravam em alguma fase do ciclo de aprovação. Em 2004 havia apenas 40 projetos e em 2005, 80. O Brasil ocupava também o 3º lugar em número de projetos (274), abaixo da Índia com 874 projetos e da China que possuía, em 2008, 1.048 projetos em alguma fase das etapas de aprovação.

Para o sucesso do projeto é importante a superação de fatores críticos, tanto relacionados a empresa desenvolvedora como da Autoridade Nacional Designada, como por exemplo:

- Definição de regras plausíveis e transparentes para a certificação das reduções de emissão;
- Validação e certificação por entidades operacionais idôneas e reconhecidas internacionalmente;
- Atribuição de responsabilidade e penalidades às entidades operacionais que validarão as certificações;
- Definição de linhas de bases consistentes.

Focando no último fator, é importante ressaltar que para evitar o risco desnecessário da não aprovação do projeto, o profissional deverá ficar atento à escolha do cenário de linha de base, esse cenário mostrará o real potencial de redução com a implementação do projeto, revelando que com a operação da base as emissões seriam mais elevadas. A linha de base agrega um valor importante, ainda que não seja uma imposição legal. Por isso, a análise do projeto para demonstração do seu potencial de redução é extremamente sensível a diferentes opções técnico-econômicas, assim, é fundamental a utilização de equações corretas no cálculo das emissões. Há uma lista de

metodologias pré-aprovadas pelo Painel de Metodologia do MDL e novas metodologias para o estabelecimento da linha de base são regularmente adicionadas (UNFCCC, 2016).

Mesmo com o fim do primeiro período do Protocolo de Kyoto, os acordos internacionais mantiveram os mecanismos de flexibilização e o comércio de créditos de carbono vem se consolidando e evoluindo. Diversas matérias publicadas ao longo de 2015 e 2016 por vários meios de comunicação revelam que projetos para “precificar” o CO₂ dobraram nos últimos três anos, porém, o preço da tonelada de CO₂ equivalente ainda é baixo para desincentivar as emissões, mesmo assim, o mercado já movimenta US\$50 bilhões de dólares. O preço da tCO₂e varia no planeta entre algo como menos de US\$1 no México e US\$130 na Suécia e em mais de 85% dos países esse preço é de menos de US\$10. No prazo de duas décadas o preço do carbono deveria aumentar em termos reais para algo entre US\$82 e US\$260/tCO₂e para de fator incentivar a redução nas emissões de CO₂, necessária para evitar que o clima aqueça mais de 2°C no planeta, além dos limites pré-industriais, que é considerado por boa parte da comunidade científica como perigoso (G1 NATUREZA, 2014, 2015a, 2015b, 2015c; LEONHARDT; STUMP, 2015).

2.4 Impactos financeiros associados as mudanças no clima

Um dos principais estudos sobre os custos financeiros das mudanças climáticas é o Relatório Stern (do nome do seu coordenador, o economista inglês Nicholas Stern), divulgado em 2006 e que considera o prazo até 2050. Ele prevê que as perdas econômicas provenientes de uma falta de reação às mudanças globais do clima podem significar prejuízos de até 20% do PIB mundial (Produto Interno Bruto, a soma de todos os bens e serviços produzidos em uma determinada região), ou seja, esses danos acontecerão se nada for feito para conter o aquecimento global. Esse mesmo estudo concluiu que o investimento necessário para evitar o cenário de enormes prejuízos seria de apenas 1% do PIB mundial investido anualmente (STERN, 2006, 2009)

O pesquisador argumenta que as mudanças climáticas vão provocar uma nova geografia física e, conseqüentemente, um novo rearranjo das ocupações humanas e que, havendo um movimento demográfico grande, haverá geração de conflitos. Para evitar situações naturais e políticas catastróficas em menos de cem anos, Stern diz que o planeta poderia suportar uma concentração de 500ppm de CO₂, assim, é necessário que, até 2050 os países em desenvolvimento reduzam em 50% suas emissões, passando de 40 para 20GtCO₂ por ano, ou 2tCO₂ per capita. Para países ricos,

esse esforço deveria começar focando em 80% das emissões, afirmando que mesmo do ponto de vista financeiro essa medida seria mais vantajosa do que deixar para resolver o problema mais tarde (ABRIL, 2008).

O relatório Stern fez com que as mudanças climáticas entrassem para a agenda de discussões de governos e das empresas de todo o mundo, desde então, tornou-se impossível pensar em desenvolvimento sem levar em conta as alterações do clima.

2.5 Otimização de sistemas através de métricas financeiras e ambientais

Os sistemas de trigerção são sistemas formados por equipamentos capazes de fornecer aquecimento, refrigeração e eletricidade. Eles são utilizados para suprir as demandas energéticas de fábricas e edifícios, por exemplo. A escolha tanto dos equipamentos como o arranjo entre eles pode variar em função das demandas, das tarifas de energia e de combustíveis, por isso é interessante analisar como esses parâmetros influenciam no sistema. Apesar da relevância de todos esses parâmetros sobre a otimização, o estabelecimento do sistema otimizado depende principalmente do objetivo ou métrica principal da otimização, podendo ser o aumento da eficiência do sistema, maiores lucros ou menores emissões de CO₂

Magnani et al. (2013) estudaram como alguns desses parâmetros influenciam nos sistemas de trigerção, focando na otimização financeira. Já Hornsby (2014) estendeu esta pesquisa incluindo além da otimização financeira também a otimização ambiental. Esses dois trabalhos são alguns dos frutos de mais de 10 anos de estudo voltado para otimização de sistemas desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Os primeiros estudos analisavam o impacto da variação da demanda de energia, vapor e água gelada sobre a otimização dos sistemas, posteriormente foram sendo incluídas análises com a variação das tarifas de energia, da tarifa de combustíveis e a influência da eficiência dos equipamentos sobre a otimização (GUERRA, 2011; MELO, 2004; MACEDO, 2007; OLIVEIRA, 2011; PETRÔNIO, 2012).

Como dito, em 2014, Hornsby incluiu na otimização além da métrica financeira o estudo da métrica ambiental, ele mostrou como elas são contraditórias quando consideradas isoladamente, pois,

geralmente, sistemas mais rentáveis, poluem bastante. Propondo, em um artigo que está em fase de análise para submissão, uma combinação simples entre as métricas foi possível estabelecer um bom compromisso entre ambas as preocupações e extrair resultados interessantes sobre o impacto dessa combinação na otimização final. Hornsby (2017) concluiu que havendo uma preocupação de no mínimo 20% e de no máximo 80% com a relevância ambiental é possível se ter resultados razoáveis para ambas as métricas.

Quando se pensa em otimizar um sistema, a métrica financeira costuma ser considerada como a mais relevantes, em detrimento da métrica ambiental. Porém, como foi visto nos tópicos anteriores o impacto sobre o meio ambiente provocado pelo modo de vida humano tem trazido consequências desastrosas. A associação de argumentos científicos, através do estudo sobre mudanças climáticas, a argumentos econômicos sobre os impactos financeiros da não ação humana frente a essas mudanças tem direcionado governos, empresas e sociedade civil para uma nova postura.

Tem-se chegado à conclusão de que, principalmente no setor energético, é necessária uma mensuração mais efetiva dos custos financeiros e dos impactos ambientais das diversas formas de energia, pois, por mais que as fontes de origem fóssil sejam mais baratas que as fontes renováveis o preço ambiental e as consequências do consumo delas são muitíssimo maiores. Por isso a precificação, de alguma maneira, do carbono é uma maneira de sinalizar para o setor energético as fontes realmente viáveis e será uma maneira de redirecionar os investimentos na área de energia no Brasil e no mundo.

O Programa de Planejamento Energético (PPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) tem contribuído com estudos relevantes em relação ao potencial brasileiro de mitigação da emissão de GEE para diversos setores. Henriques publicou, em 2010, um estudo mostrando o potencial de redução na emissão de GEE no setor industrial brasileiro e Rathmann (2012) mostrou como a adoção de metas de redução impactam sobre a competitividade do setor industrial. Schaeffer (2014) mostrou o cenário e as alternativas para a adaptação as mudanças climáticas no Brasil.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda quatro tópicos gerais, o primeiro traz definições importantes para o melhor entendimento da função objetivo da métrica financeira que será utilizada, o segundo tópico fala sobre a métrica ambiental e o terceiro tópico traz a otimização financeira e ambiental de um caso simples para um melhor entendimento do processo de otimização.

Um dos métodos mais clássicos para otimizar os sistemas térmicos é o método da programação linear (CHO et al., 2009; MAGNANI et al., 2013), com a limitação de que são exigidas equações lineares e variáveis contínuas para a função objetivo e restrições. Como métricas para a otimização financeira a literatura mostra que geralmente são usados o valor presente líquido (MAGNANI et al., 2013; PIACENTINO; CARDONA, 2008; REZVAN; GHARNEH; GHAREHPETIAN, 2012; SHEIKHI; RANJBAR; ORAEE, 2012), assim como, os custos operacionais, custos internos, taxa de retorno, *payback* e custos anuais (CHO et al., 2009; MAGO; CHAMRA, 2009; MAGO; HUEFFED, 2010; SHEIKHI; RANJBAR; ORAEE, 2012; WANG; JING; ZHANG, 2010).

Já para a otimização ambiental são utilizadas como métricas a quantidade de CO₂ emitida, emissão de gases de efeito estufa e avaliação do ciclo de vida (MAGO; CHAMRA, 2009; MAGO; HUEFFED, 2010; REZVAN; GHARNEH; GHAREHPETIAN, 2012; WANG; JING; ZHANG, 2010; WANG et al., 2011a, 2011b).

A métrica financeira utilizada será o valor presente líquido e a métrica ambiental será a emissão de dióxido de carbono (CO₂), o financeiro será calculado em dólares (US\$) e o ambiental em quilogramas de CO₂ equivalente ou toneladas de CO₂ equivalente (kgCO_{2e} ou tCO_{2e}).

3.1 Pesquisa operacional e programação linear

A programação linear é uma das muitas ferramentas da pesquisa operacional. A pesquisa operacional (PO) é um método científico de tomada de decisões que consiste na descrição de um sistema organizado com o auxílio de um modelo na descoberta da melhor maneira de operar o sistema (LACHTERMARCHER, 2009). A PO apresenta algumas fases comuns a toda resolução do problema. São elas:

- Formulação do problema: o administrador e o responsável pelo estudo em P.O. deverão analisar o problema para obter uma formulação clara e coerente, definindo os objetivos a alcançar e quais os possíveis caminhos alternativos para que isso ocorra. Levantar limitações técnicas do sistema e as relações com outros sistemas da empresa ou do ambiente externo. Validar as possíveis soluções considerando esses obstáculos e estabelecer uma medida de eficiência para ordenar as soluções encontradas.
- Construção do modelo do sistema: construir modelos formados por equações e inequações (modelos matemáticos). Uma das equações serve para medir a eficiência do sistema para cada solução proposta (função objetivo ou função de eficiência). As outras equações descrevem as restrições ou limitações técnicas do sistema (NASCIMENTO, 2012).
- Cálculo da solução através do modelo: é feito por meio de técnicas matemáticas específicas. A construção de um modelo deve considerar uma técnica para o cálculo da solução.

Uma das técnicas mais usadas para a resolução de problemas na pesquisa operacional é a programação linear. Um problema de programação matemática é linear se a função objetivo e as restrições são equações e/ou inequações lineares. Justifica-se sua aplicação pela simplicidade do modelo envolvido e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador (HILLIER; LIEBERMAN, 2005; LACHTERMARCHER, 2009).

A construção do modelo matemático é das partes mais complicada do estudo. Não há uma regra fixa para esse trabalho, mas é possível seguir um roteiro que ajuda a ordenar o raciocínio (HILLIER; LIEBERMAN, 2005; LACHTERMARCHER, 2009; NASCIMENTO, 2012).

O roteiro contém as seguintes etapas:

Etapa 1: Definir as variáveis de decisão.

Explicitar as decisões que devem ser tomadas e representar as possíveis decisões por meio de variáveis de decisão.

Etapa 2: Definir o objetivo.

Identificar o objetivo da tomada de decisão. A função objetivo é a expressão que calcula o valor do objetivo em função das variáveis de decisão.

Etapa 3: Estabelecer as restrições.

Cada restrição imposta na descrição do sistema deve ser expressa como uma relação linear (igualdade ou desigualdade), formuladas com as variáveis de decisão.

As etapas 1 e 2 do roteiro podem ser executadas simultaneamente.

Existem duas formas para trazer uma solução para modelos de programação linear: o método gráfico e o método simplex. O método gráfico resolve modelos de programação linear com duas variáveis de decisão. Essa técnica consiste em representar num sistema de eixos ortogonais o conjunto das possíveis soluções do problema, isto é, representar o conjunto de pontos que obedecem ao grupo de restrições impostas pelo sistema. O desempenho do modelo é avaliado pela representação gráfica da função objetivo.

O método simplex é composto por critérios de escolha de soluções básicas que melhorem o desempenho do modelo e de um teste de “otimalidade”. Assim, o problema deve apresentar uma solução básica inicial e as soluções básicas subsequentes são calculadas com a troca de variáveis básicas por não básicas, gerando novas soluções. Diversos softwares possuem um algoritmo interno para buscar soluções através da programação linear. O MATLAB será o software utilizado nessa dissertação para otimizar o sistema genérico através da programação linear.

3.2 Valor presente líquido

O valor presente líquido (VPL) de um fluxo de caixa é obtido pela soma de todos os valores futuros de fluxo de caixa, trazidos para a data presente, com o valor do fluxo de caixa na data inicial (investimento inicial). Essa métrica deve ser utilizada quando se deseja comparar alternativas, a alternativa que oferecer o maior VPL será a mais atrativa. Se a comparação for feita entre alternativas em que só haja custos, o VPL que for o menor será o mais atrativo.

$$VPL = VI + \mu \cdot VM \quad 1$$

$$\mu = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} \quad 2$$

Onde, VI é o investimento inicial (em unidades monetárias), VM é o custo mensal (em unidades monetárias), μ é o fator do valor presente, n é o número de meses e i a taxa de juros mensal.

3.3 Monitoramento ambiental

A métrica que melhor oferece capacidade de monitoramento e verificação é aquela que indica um percentual de redução relativo às emissões de um certo ano base já inventariado (MOTTA et al., 2011)

No âmbito empresarial as métricas variam de acordo com o setor que cada empresa se encontra. Em geral, a métrica mais comum é a redução percentual relacionada a um ano base, mas há também metas de redução de intensidade de emissões (MONZONI, 2011)

Para o setor de mineração a métrica quase única é de redução percentual de emissões de GEE relacionada a um ano base. Para os setores de carvão, de níquel e de minério de ferro, observa-se um comportamento claro de empresas mineradoras em estabelecer metas de redução de emissão de GEE globais para suas operações (MONZONI, 2011).

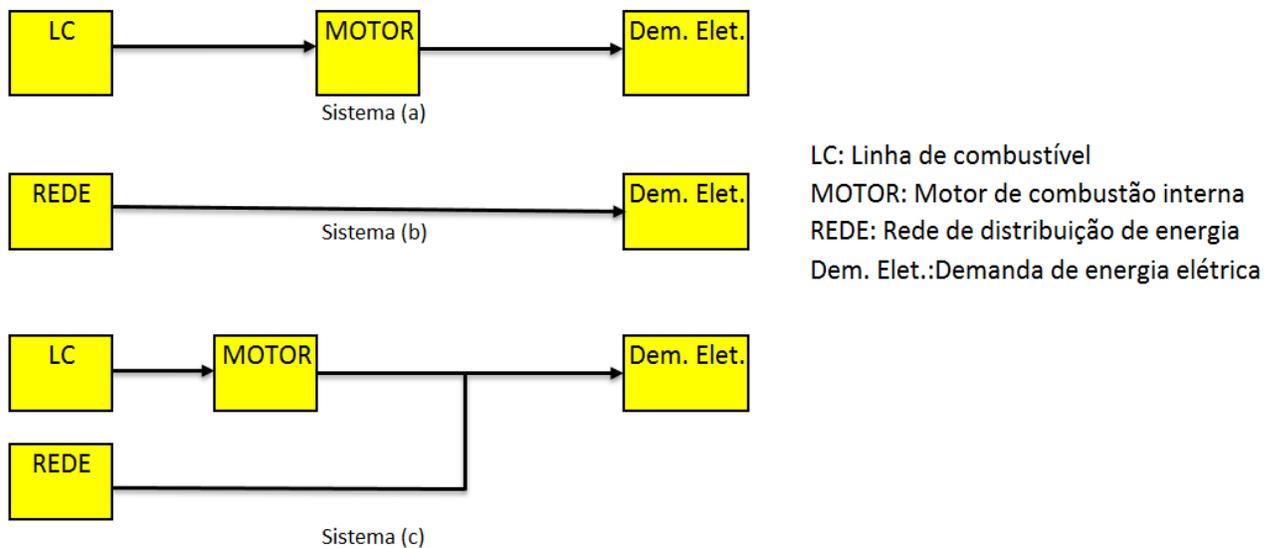
Para o setor de fertilizantes a meta comum também é a redução percentual de emissões de GEE relacionada a um ano base. No setor de óleo e gás observa-se que os tipos de métricas se misturam em redução percentual relacionada a um ano base, reduções absolutas e reduções de intensidade (MONZONI, 2011).

É possível notar pelas referências acima que a métrica ambiental analisada gira em torno de quantificar as emissões emitidas, geralmente em termos da quantidade de dióxido de carbono, ou então de outros GEE, como metano e óxido nitroso.

3.4 Otimização de sistemas: caso simples

Para um melhor entendimento do processo de modelagem e otimização de sistemas térmicos, são mostrados na figura 1 três tipos de sistema, cuja finalidade é fornecer 100kW de eletricidade para uma indústria (720 horas por mês, durante 120 meses). Um com a demanda de energia elétrica sendo suprida apenas pelo acionamento do motor (a), um com a demanda de energia elétrica sendo suprida apenas pela solicitação de energia da rede de distribuição (b) e um terceiro exemplo onde a demanda de energia elétrica é suprida pelo acionamento do motor no horário de ponta e pela rede no horário fora de ponta, pois, existe diferença na tarifação de energia elétrica nos horários de pico (horário compreendido entre às 18 e 20h) onde a tarifa é mais cara.

Figura 1: Configuração do sistema do caso simples. (a) apenas motor; (b) apenas rede; (c) combinação rede motor.



Fonte: Elaborado pela autora

Utilizando as tarifas empregadas para as indústrias de Pernambuco para consumo de gás natural e rede elétrica (por matriz hidrelétrica), é possível realizar manualmente os cálculos dos custos iniciais para a aquisição dos equipamentos em cada caso e o custo mensal na compra de combustível e energia elétrica tanto do ponto de vista financeiro (calculado em dólar), quanto do ponto de vista ambiental (calculado em termos da quantidade de CO₂ emitida).

Neste estudo de caso simples, ao contrário de todo o restante do trabalho, o cálculo é realizado considerando somente os custos da operação do sistema e a emissão de CO₂ gerada, assim, o melhor sistema será o que apresentar menor custo financeiro e menor emissão de poluentes.

Para o sistema “a” foi obtido um valor presente líquido financeiro (VPL_{fin}) de 897 milhões de dólares e um valor presente líquido ambiental (VPL_{amb}) de 5679 toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e). Para o sistema “b” foi calculado um VPL_{fin} de 904 milhões de dólares e um VPL_{amb} de 3414 tCO₂e e para o sistema “c” obteve-se um VPL_{fin} de 762 milhões de dólares e um VPL_{amb} de 3611 tCO₂e.

Assim, como base na otimização dos três sistemas, foi possível verificar que o sistema “c” é o melhor do ponto de vista financeiro, pois, apresentou menor custo de instalação e operação e, do ponto de vista ambiental, o sistema “b” é o melhor apresentando a menor quantidade de CO₂.

Com esse estudo de caso simples é possível verificar que para inferir qual sistema é o melhor dentre várias possibilidades é necessário estabelecer que métrica será considerada.

4 MÉTODOS, MODELAGEM E DADOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia dos estudos de caso 1 e 2 e sua modelagem. Como pôde ser visto no último tópico da revisão bibliográfica (tópico 2.5), diversos estudos voltados para a otimização de sistemas já foram desenvolvidos no grupo de pesquisa LOST. Assim, a modelagem utilizada nesta dissertação vem de um processo de modificação e evolução, por isso, este capítulo será iniciado apresentando a métrica utilizada no processo de otimização na sua forma mais geral e posteriormente os casos particulares pertinentes serão apresentados.

Após a apresentação da métrica, será abordado como foi o processo utilizado para a otimização dos sistemas em função dos parâmetros variados. O tópico seguinte abordará um passo do processo de otimização que é a modelagem matemática utilizada na programação linear. Os dois últimos tópicos abordam o detalhamento de cada estudo de caso e os dados necessários.

4.1 Métrica

O valor presente líquido (VPL) é uma métrica que calcula os fluxos de caixa iniciais e mensais de um empreendimento, durante um certo período de tempo, corrigidos para o valor presente. No grupo de pesquisa o VPL é calculado tanto em termos financeiros, VPL_{fin} , (FREITAS, 2016; GUERRA, 2011; MACEDO, 2007; MAGNANI; MELO, 2009; MELO, 2004; OLIVEIRA, 2011; PETRÔNIO, 2012) quanto em termos ambientais, VPL_{amb} , (HORNSBY, 2014).

Em um artigo, que está em fase de análise para publicação, Hornsby et al., (2017) propôs a combinação linear das duas métricas através de um fator, designado como α . Na combinação a relevância ou peso da métrica financeira em relação a ambiental poderia variar (variação do α), fazendo com que fosse possível a análise dos extremos (α igual a 0 e 1) e a análise de valores intermediários do fator. Para α igual a 0 o VPL considerado era apenas o ambiental e para α igual a 1 o VPL considerado era apenas o financeiro, logo, para um valor intermediário, por exemplo, 0,6 o VPL final somava 60% do VPL financeiro com 40% do VPL ambiental. Assim, foi possível verificar a implicação desse peso na escolha do sistema otimizado, já que o VPL estaria combinando o financeiro e o ambiental.

Uma das grandes contribuições desta dissertação para a evolução dos estudos de otimização de sistemas térmicos realizado pelo LOST foi a inclusão da tarifa do crédito de carbono no cálculo do VPL. Essa tarifa será designada como γ ao longo do texto. O que é o crédito de carbono e os critérios necessários para que uma empresa possa vender esses créditos e obter retorno financeiro são mostrados detalhadamente no tópico 2.3 desta dissertação. Porém, é preciso lembrar três pontos principais, o primeiro é que o crédito de carbono é um parâmetro que tem cunho tanto financeiro quanto ambiental; o segundo é que esse crédito só pode ser vendido se a empresa comprovar que a implementação do projeto trouxe reduções, quando comparada com a linha base, mostrando que sem a existência dele as emissões seriam mais elevadas; e o terceiro é que é necessário o cálculo da linha base.

A tarifa do crédito de carbono é dada em US\$/tCO_{2e}, mostrando que a cada tonelada de CO₂ equivalente retirada da atmosfera ou deixada de ser emitida traz um certo valor monetário associado. Assim, o retorno financeiro total referente a venda do crédito de carbono será a tarifa atual do crédito de carbono (γ) multiplicada pela diferença entre a linha de base e o que o sistema otimizado emitiu (D_{amb}). É importante ressaltar que o valor da D_{amb} só será computado no valor final do VPL caso o sistema otimizado emita menos ou a mesma quantidade de poluentes do que a linha base (ou seja, $D_{amb} \geq 0$), pois, não há ganho financeiro associado se o sistema otimizado emitir mais que a linha base (ou seja, $D_{amb} < 0$).

Com base nessa explicação é possível inferir o formato geral da métrica, valor presente líquido, utilizada nas pesquisas do LOST (equação 3)

$$VPL_{\alpha,\gamma} = \alpha.VPL_{fin} + (1 - \alpha).VPL_{amb} + D_{amb} \cdot \gamma \quad 3$$

Note que quando α é igual a 1 e γ é igual a zero o VPL global considera apenas o financeiro e quando α e γ são iguais a zero o VPL global considera apenas o ambiental. No LOST, até o momento, são estudadas as seguintes possibilidades para α e γ (tabela 2).

Tabela 2: Tipo de otimização realizada em função de α e γ .

Valores para α	Valores para γ	Objetivo da otimização	Equação
$\alpha = 1$	$\gamma = 0$	Otimização financeira.	4
$\alpha = 0$	$\gamma = 0$	Otimização ambiental.	5
$\alpha = [0, 1]$	$\gamma = 0$	Otimização combinada	6
$\alpha = 1$	$\gamma = [0, \infty]$	Otimização financeira com créditos de carbono.	7

A equação da métrica, VPL, nos casos particulares são as seguintes:

$$VPL_{\alpha=1,\gamma=0} = VPL_{fin} = VI_{fin} + \mu_{fin} \cdot VM_{fin} \quad 4$$

$$VPL_{\alpha=0,\gamma=0} = VPL_{amb} = VI_{amb} + \mu_{amb} VM_{amb} \quad 5$$

$$VPL_{\alpha=[0,1],\gamma=0} = VPL_{comb} = \alpha \cdot VPL_{fin} + (1 - \alpha) \cdot VPL_{amb} \quad 6$$

$$VPL_{\alpha=1,\gamma=[0,\infty]} = VPL_{cc} = VPL_{fin} + D_{amb} \cdot \gamma \quad 7$$

A equação 6 representa a forma do cálculo da métrica para o estudo de caso 1, a equação 7 representa a forma do cálculo da métrica para o estudo de caso 2, as equações 4 e 5 são necessárias para o cálculo do valor presente líquido financeiro e ambiental. Assim, será avaliado qual a implicância da variação do fator α ou γ sobre a escolha do sistema otimizado.

4.2 Processo de otimização do sistema

O processo de otimização determinará dentre várias possibilidades de equipamentos disponíveis qual a configuração ótima do sistema de trigeriação, com relação a métrica utilizada. A programação linear foi o método escolhido para otimizar o sistema, para isso, é necessário determinar a função objetivo, as variáveis de decisão e as restrições impostas ao sistema, como foi visto no tópico 3.1.

As variáveis de decisão do problema são as potências operacionais dos equipamentos, as quais dependem diretamente das potências nominais disponíveis. Contudo, esses equipamentos estão disponíveis para compra com valores discretos de potência nominal e esses valores, na maioria das vezes, não são uniformemente distribuídos. Será mostrado mais adiante que nem todos os termos da função objetivo são lineares. Assim, a não continuidade e não uniformidade no espaçamento das variáveis e a não linearidade da função objetivo dificulta o uso de métodos clássicos de otimização, como a programação linear.

Para resolver o problema Magnani et al. (2013) propuseram um método híbrido de quatro etapas para o processo de otimização do sistema, a saber:

1. Proposição do sistema;
2. Escolha das potências nominais para cada equipamento;

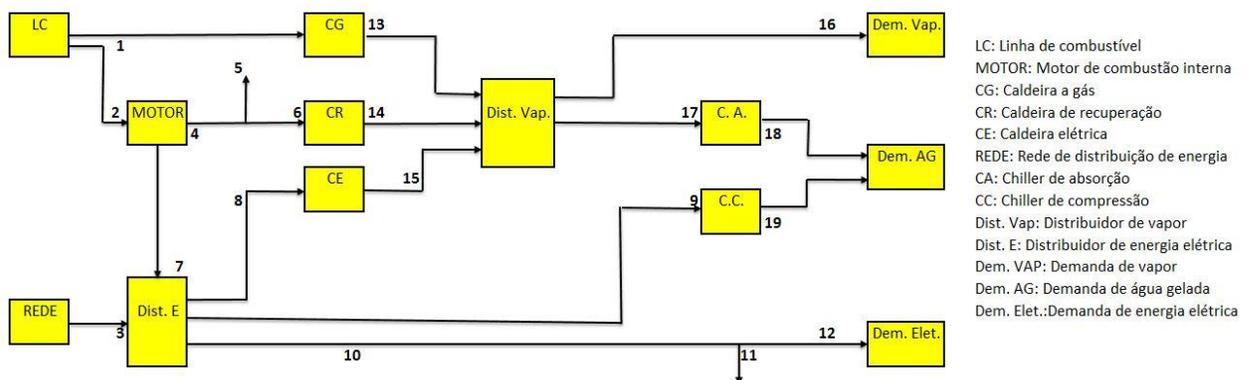
3. Busca exaustiva de todas as configurações do sistema possíveis, através da permutação dos equipamentos;
4. Uso da programação linear para otimizar os fluxos de energia, com variáveis lineares, para cada permutação de equipamentos.

As etapas 1 e 2 são manuais e podem ser escolhidas dentre um universo de possibilidade de sistemas e potências, as etapas 3 e 4 foram realizadas computacionalmente e dependem da escolha feita anteriormente. Depois de realizada a programação linear em cada uma das configurações possíveis será escolhida a configuração que retornou o melhor resultado para a métrica estudada. Nos próximos tópicos as etapas 1 e 4 serão detalhadas.

4.2.1 Proposição do sistema térmico

O sistema de trigeração deveria ser capaz de suprir uma certa demanda de energia elétrica, vapor e água gelada, para isso projetou-se um sistema genérico formado por um motor, 3 caldeiras (caldeira de queima direta – caldeira a gás, caldeira de recuperação e caldeira elétrica) e dois chillers (chiller de compressão e chiller de absorção), além da linha de transmissão de energia elétrica e a linha de combustível, necessárias para a transmissão de energia. O sistema genérico, com as respectivas legendas para cada equipamento, pode ser observado na figura2.

Figura 2: Sistema genérico.



Fonte: Elaborado pela autora

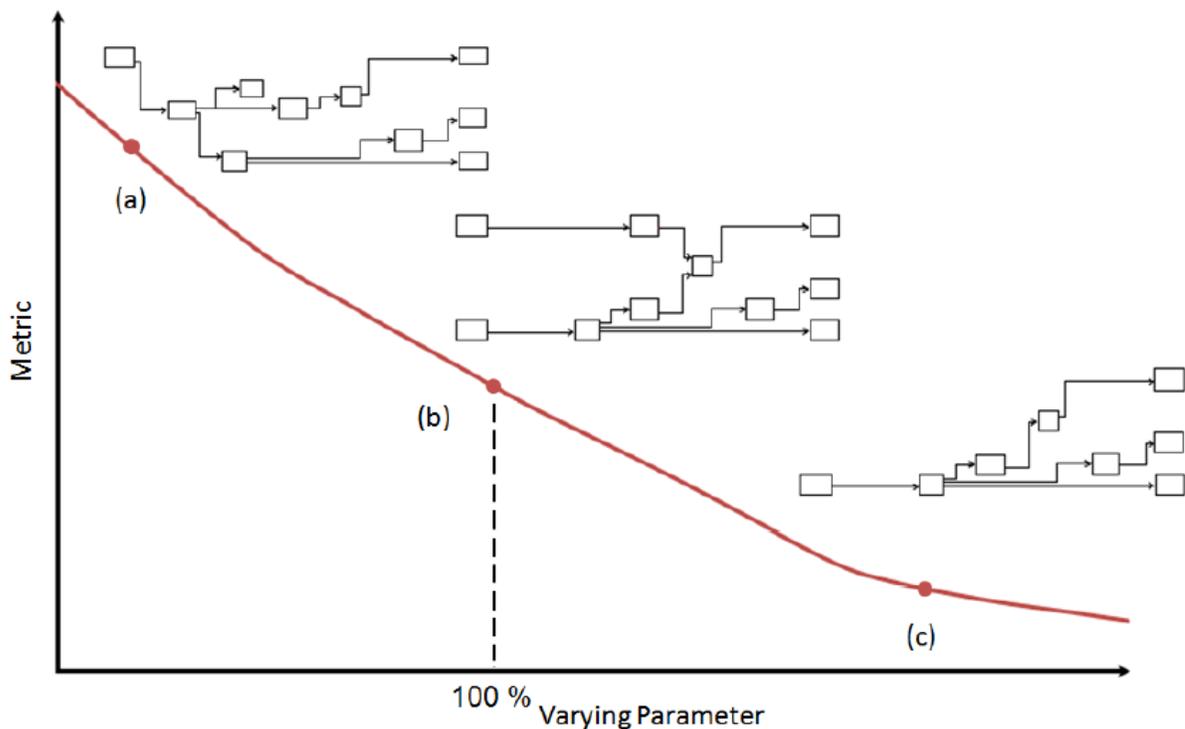
O sistema genérico é classificado como um sistema de trigeração, por suprir três demandas energéticas (vapor, água gelada e energia elétrica) e de cogeração. Por definição a cogeração é a

conversão de diferentes tecnologias de energia mediante sua integração para gerar energia térmica (OCHOA; DUTRA; GUERRERO, 2011), assim, o possível reaproveitamento dos gases de combustão provenientes do grupo motogerador e das caldeiras para gerar vapor e acionar o chiller de absorção é uma forma de cogeração

Para cada equipamento foram escolhidas previamente algumas opções de potência nominal (elas serão mostradas no final do tópico 4.5). Como foi visto, o processo de otimização determina a potência nominal ideal para cada equipamento, bem como a sua operação horária. Como a potência nominal pode ser ocasionalmente nula, o sistema otimizado será um subconjunto do sistema genérico. Diante dessa possibilidade de adaptação do sistema genérico mediante as variáveis e a métrica utilizadas na otimização, ele foi chamado também de sistema adaptativo.

A figura 3 traz um exemplo claro da capacidade de adaptação do sistema genérico mediante a métrica e mediante ao parâmetro variado. Nela é possível observar que para cada valor do parâmetro variado tem-se um valor otimizado para a métrica e um configuração ótima do sistema.

Figura 3: Configuração do sistema ao longo da curva otimizada.



Fonte: HORNSBY, 2014.

O sistema genérico precisa atender a três demandas horárias, a saber, vapor, água gelada e energia elétrica. Ele opera durante os sete dias da semana, porém, foram escolhidos três categorias ou dias característicos, a saber, dias úteis, sábado e domingo, pois, de segunda a sexta a demanda é igual, mas, no sábado e domingo as demandas são diferentes. Assim, com três dias característicos e 24h cada, são totalizadas 72 horas com diferentes demandas. Foram utilizados os dados de demanda levantados por Freitas (2016), que fez um estudo energético e econômico de sistemas para suprimento das demandas de shopping centers de Pernambuco. Em Freitas (2016) não havia demanda de vapor, porém, neste trabalho, uma demanda de vapor foi considerada, sendo igual a demanda de água gelada, já que simula o suprimento de um setor de utilidades. Devido ao volume de dados a tabela com as demandas foi inserida no apêndice.

4.2.2 Modelagem

Como foi mostrado nos passos para o processo de otimização do sistema, a programação linear foi o método utilizado para modelar o sistema. A função objetivo é o valor presente líquido (VPL), as variáveis de decisão são as potências de operação horária de cada equipamento (x_i 's), as quais dependem das potências nominais dos equipamentos (restrições).

A função objetivo modela um problema de otimização com sete variáveis discretas e não uniformemente espaçadas (potência nominal dos equipamentos). Estabelecendo a potência nominal dos 7 equipamentos, é possível mensurar as potências de operação dos 19 pontos físicos do sistema genérico, como tem-se 3 dias característicos com 72h no total, o modelo apresenta como dado de saída 1368 (72x19) valores de potência operacional. Assim, tem-se:

Função objetivo:
$$VPL_{\alpha,\gamma} = \alpha.VPL_{fin} + (1 - \alpha).VPL_{amb} + D_{amb} \cdot \gamma$$

Variáveis de decisão:
$$X_j, \text{ onde } j = (t - 1).np + i$$

As variáveis de decisão foram escritas dessa forma para facilitar a sua identificação no sistema genérico em função da posição (representada pela letra i) e do tempo (representado pela letra t). Onde np é o número de pontos. No sistema geral apresentado np é igual a 19 (ver figura 2). O tempo (t) varia de 1 a 72 e a posição (i) varia de 1 a 19. As variáveis de decisão para t igual a 1 tem índice variando de 1 a 19, já para t igual a 2, as variáveis de decisão têm índices que variam de 20

a 38 e assim sucessivamente. Por exemplo, a operação da caldeira elétrica ($i=15$) na primeira hora ($t=1$) é dada pela variável X_{15} , já às 2h ($t=2$) será o X_{34} , para às 3h ($t=3$) será X_{53} e assim por diante.

Restrições: há 14 restrições para o sistema. Elas são mostradas em Magnani et al. (2013), a seguir são mostrados cinco exemplos de restrições, a primeira mostra a restrição do chiller de absorção e a segunda a da caldeira de recuperação, sendo COP_{CA} e η_{CR} o coeficiente de performance do chiller de absorção e o rendimento da caldeira de recuperação, respectivamente. As três últimas mostram a restrições dos x 's de saída que devem ser iguais a demanda requerida.

$$X_{(t-1).np+18} - COP_{CA} \cdot X_{(t-1).np+17} = 0 \quad 8$$

$$X_{(t-1).np+14} - \eta_{CR} \cdot X_{(t-1).np+6} = 0 \quad 9$$

$$X_{(t-1).np+18} + X_{(t-1).np+19} = DEM_{AG} \quad 10$$

$$X_{(t-1).np+16} = DEM_{VAP} \quad 11$$

$$X_{(t-1).np+12} = DEM_{EE} \quad 12$$

Limites inferior e superior das variáveis: a potência de saída dos equipamentos é restrita por limites inferior e superior. O limite inferior é zero e o superior é a potência nominal. Assim:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X_{(t-1).np+3} \leq N_{rede} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+7} \leq N_{motor} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+13} \leq N_{cg} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+14} \leq N_{cr} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+15} \leq N_{ce} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+18} \leq N_{ca} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+19} \leq N_{cc} \end{array} \right. \quad 13$$

Para os outros pontos não são definidos os limites, pois, essas potências são indiretamente limitadas pela potência nominal dos equipamentos principais, dados pela restrição. Assim:

$$0 \leq X_{(t-1).np+i} \leq \infty, \forall i = 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 17. \quad 14$$

O VPL leva em consideração a parcela inicial e a parcela mensal corrigida pelo fator do valor presente (μ), como pode ser visto na equação 15.

$$VPL_{fin,amb} = VI_{fin,amb} + \mu_{fin,amb} VM_{fin,amb} \quad 15$$

O valor inicial leva em consideração os custos com a aquisição dos equipamentos principais (dados pela potência nominal) e os custos com os equipamentos secundários (dados em função do valor máximo necessário de combustível e de energia elétrica). Os equipamentos secundários são as linhas de combustível, as linhas de transmissão de energia elétrica e os distribuidores de energia. Com isso é possível escrever as equações 16 a 18.

$$VI_{fin,amb} = VI_{principal} + VI_{secundário} \quad 16$$

$$VI_{principal} = \sum_{equip} k_{inv,equip} \cdot N_{equip} \quad 17$$

$$VI_m = k_{inv,FL} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + k_{inv,EG} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+3}) + \quad 18$$

$$k_{inv,EP} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+8} + x_{(t-1)np+9} + x_{(t-1)np+10}) + k_{inv,SM} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+16} + x_{(t-1)np+17})$$

O valor mensal também possui duas parcelas, o VP é o custo da tarifa elétrica de potência máxima (carga de demanda) e o VE é o custo de vida do consumo elétrico e de combustível, levando também em conta a venda de eletricidade,

$$VM_{fin,amb} = VP + VE \quad 19$$

$$VP = \frac{1}{2} \left[\max_{t=1, \frac{nt}{4}} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) + \max_{t=\frac{nt}{4}+1, \frac{nt}{2}} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) \right] \mu_I \cdot k_{pow,high,I} + \quad 20$$

$$\frac{1}{2} \left[\max_{t=1, \frac{nt}{4}} (x_{(t-1)np+3} \cdot (1-h_t)) + \max_{t=\frac{nt}{4}+1, \frac{nt}{2}} (x_{(t-1)np+3} \cdot (1-h_t)) \right] \mu_I \cdot k_{pow,low,I} +$$

$$\frac{1}{2} \left[\max_{t=\frac{nt}{2}+1, \frac{3}{4}nt} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) + \max_{t=\frac{3}{4}nt+1, nt} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) \right] \mu_{II} \cdot k_{pow,high,II} +$$

$$\frac{1}{2} \left[\max_{t=\frac{nt}{2}+1, \frac{3}{4}nt} (x_{(t-1)np+3} \cdot (1-h_t)) + \max_{t=\frac{3}{4}nt+1, nt} (x_{(t-1)np+3} \cdot (1-h_t)) \right] \mu_{II} \cdot k_{pow,low,II}$$

$$VE = \sum_{d=1}^6 \sum_{t=(d-1)\frac{nt}{12}+1}^{\frac{d \cdot nt}{12}} \left\{ k_{fuel,I} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + [h_t k_{energy,high,I} + (1-h_t) k_{energy,low,I}] x_{(t-1)np+3} \right. \quad 21$$

$$\left. - k_{sell,I} x_{(t-1)np+11} \right\} \cdot \tau_d +$$

$$\sum_{d=7}^{12} \sum_{t=(d-1)\frac{nt}{12}+1}^{\frac{d \cdot nt}{12}} \left\{ k_{fuel,II} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + [h_t k_{energy,high,II} + (1-h_t) k_{energy,low,II}] x_{(t-1)np+3} \right.$$

$$\left. - k_{sell,II} x_{(t-1)np+11} \right\} \cdot \tau_d$$

O passo a passo para obtenção de cada uma dessas equações acima é encontrado em Magnani et al. (2013).

4.3 Estudo de caso 1: impacto da variação do alpha sobre a otimização do sistema

O estudo de caso 1 é o terceiro tipo de otimização realizado no LOST (conforme é mostrado na tabela 2). Nele a tarifa de crédito de carbono é zero ($\gamma=0$) e o fator (α) varia de zero a 1. O objetivo desse estudo foi observar como a combinação da métrica financeira com a ambiental interfere na escolha do sistema ótimo. Hornsby et al. (2017) verificaram as mudanças na escolha do sistema ótimo simulando a operação de um sistema de trigeração para um prédio comercial instalado em Recife e em Boston. Nesta dissertação o mesmo estudo foi realizado, otimizando um sistema de utilidades instalado numa indústria de Pernambuco.

Relembrando, a métrica desse estudo de caso tem o seguinte formato (equação 6):

$$VPL_{comb} = VPL_{\alpha=[0,1],\gamma=0} = \alpha \cdot VPL_{fin} + (1 - \alpha) \cdot VPL_{amb}$$

Com base na modelagem descrita anteriormente, foi possível otimizar o sistema genérico a partir da variação do fator α . O fator variou de 0 a 1 com um passo de 0,1. Para cada ponto foi calculado o VPL_{comb} , o VPL_{fin} e o VPL_{amb} . Os resultados obtidos para esse estudo de caso serão apresentados no tópico 5.1.

4.4 Estudo de caso 2: impacto da variação do gama sobre a otimização do sistema

O estudo de caso 2 traz a inclusão do crédito de carbono ($\gamma \neq 0$), uma variável que tem por essência cunho tanto financeiro quanto ambiental. Essa inclusão traz ganhos interessantes para o sistema, que agora pode ter um retorno financeiro associado a redução da emissão de CO₂. Assim, foi verificada a influência do valor da tarifa no processo de otimização do sistema. Neste estudo o valor do fator α é igual a 1. Primeiramente foi necessário o estabelecimento da linha de base, após essa determinação o sistema foi otimizado e o valor da métrica em função de γ foi calculado.

Relembrando, a métrica desse estudo de caso tem o seguinte formato (equação 7):

$$VPL_{cc} = VPL_{\alpha=1,\gamma=[0,\infty]} = VPL_{fin} + D_{amb} \cdot \gamma$$

Lembrando também que o parâmetro D_{amb} é a diferença entre a linha de base (LB) e a emissão do sistema otimizado. Como mencionado anteriormente, a D_{amb} deve ser positiva para que haja ganho financeiro. Como a emissão do sistema otimizado é dada pelo valor presente líquido ambiental tem-se que:

$$D_{amb} = \text{máx}(LB - VPL_{amb}, 0) \quad 22$$

A equação 22 mostra que o valor da D_{amb} computado para o cálculo do VPL é o máximo valor entre a diferença e o zero.

O sistema escolhido para o cálculo da linha de base, será mostrado no próximo subtópico. Com a linha de base estabelecida foi possível verificar o potencial de redução de emissão em tCO₂e do sistema otimizado em função da tarifa de crédito de carbono (γ). O valor do crédito de carbono

variou de US\$0 a US\$320 com um passo de US\$32. Os resultados obtidos para esse estudo de caso são apresentados no tópico 5.2.2.

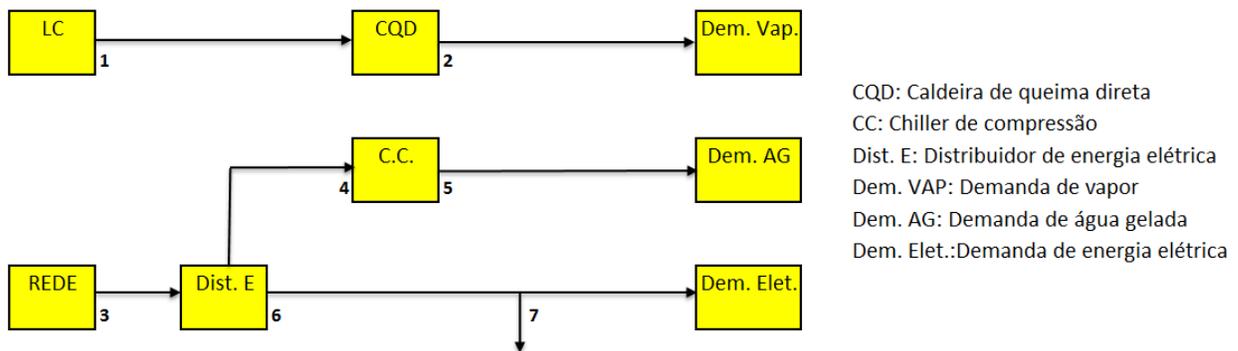
4.4.1 Estabelecendo a linha de base

Como foi visto no tópico 2.3 o MDL é exigente quanto ao cálculo das emissões reduzidas – linha de base. A determinação dessas emissões de forma correta e permanente é fundamental para garantir a efetiva redução dos gases de efeito estufa em relação ao cenário que antecedeu ao MDL. Com base nisso, para esse trabalho em questão foi calculado o valor da linha de base, ou seja, a emissão de CO₂ do sistema anteriormente utilizado. Vale ressaltar que as demandas de energia, água gelada e vapor são as mesmas e o tempo de operação do sistema também, assim como as potências nominais e os custos e ganhos financeiros e ambientais, porém, o sistema térmico não é o mesmo que o sistema genérico, contudo, é um caso particular dele, como será visto a seguir.

O sistema genérico é um sistema de cogeração, onde há uma preocupação com a integração dos equipamentos para o aumento da eficiência total, além disso, esse sistema passará por um processo de otimização que depende da métrica e da variável parametrizada. Já o sistema que dará o valor da linha de base simula a estrutura do sistema antes de sua modernização e otimização, ou seja, é o sistema antes do estabelecimento de um novo projeto passível de ser homologado pela Autoridade Nacional Designada do MDL e com potencial real de redução de emissões.

Para isso foi escolhido um sistema que supre a demanda de vapor através do acionamento de uma caldeira de queima direta (operada por óleo diesel ou gás natural), supre a demanda de energia elétrica através da rede de distribuição (proveniente de hidrelétrica ou termelétrica) e que aciona um chiller de compressão para o suprimento da demanda de água gelada. Assim, a configuração do sistema é um subconjunto do sistema genérico, o sistema utilizado para o estabelecimento da linha de base pode ser observado na figura 4.

Figura 4: Configuração do sistema usado para o estabelecimento da linha de base.



Fonte: elaborado pela autora.

Dependendo do segmento da indústria, da necessidade energética e do país onde a indústria está instalada existe uma tendência de usar óleo diesel ou gás natural como combustível ou uma malha energética baseada em termelétrica ou hidrelétrica. Por isso, para o estabelecimento da linha de base foram feitas simulações com essas quatro fontes de energia combinadas entre si. Nos resultados apresentados no tópico 5.2.1 será mostrado qual escolha foi realizada e porquê. Vale ressaltar que a simulação do sistema foi feita para α igual a 1, pois, foi considerado que antes da implementação do MDL a métrica ambiental não era incluída como objetivo da otimização. Por fim, o objetivo principal desta etapa foi quantificar a emissão em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) do sistema em questão, ou seja, o objetivo foi quantificar a linha de base.

4.5 Dados

O conteúdo apresentado neste tópico é de extrema importância para a posterior análise crítica dos resultados, que será realizada no capítulo 5, pois, neste tópico os custos e ganhos financeiros e o impacto ambiental gerado por cada equipamento e pela operação do sistema como um todo são apresentados. Para todos os dados de tarifas elétricas, tarifas de combustíveis e dados técnicos dos equipamentos necessários, fontes confiáveis e recentes foram consultadas para que fosse possível um cálculo mais realístico dos dados de saída.

Como foi mostrado na metodologia dos estudos de caso, a função objetivo é o valor presente líquido, como o tempo de operação do sistema é de 20 anos, se faz necessário trazer o valor do futuro para o presente através da correção monetária pela variável financeira chamada de fator do

valor presente. A taxa utilizada foi baseada na taxa SELIC que no ano de 2015 teve valor médio de 0,9525% a.m. Assim, obtêm-se um fator do valor presente financeiro de 94,2 (μ_{fin}) e um fator do valor presente ambiental igual a 240 (μ_{amb}).

De acordo com as peculiaridades dos diferentes estudos de caso os dados de entrada na simulação necessários para otimização diferiram. Por exemplo, o estudo de caso 1 necessitou de dados do gás natural e da hidrelétrica, já para o estabelecimento da linha de base (um dos tópicos do estudo de caso 2) foram utilizados também dados do óleo diesel e da termelétrica. Os valores de compra de energia foram convertidos em dólar, que possuía cotação média de 2,35R\$/US\$ para o ano de 2014, ano que o levantamento de dados começou a ser realizado pela autora. As tabelas 3 e 4 a seguir apresentam os dados financeiros e ambientais do gás natural e do óleo diesel, respectivamente e as tabelas 5 e 6 os custos com a energia elétrica financeiros e ambientais, respectivamente.

Tabela 3: Dados para o gás natural.

Dado	Gás natural	Fonte
$tar_{comb}(US\$/m^3)$	0,580	(COPERGÁS, 2014a)
$PCI(kJ/m^3)$	35564,0	(COPERGÁS, 2014b)
$k_{combfin}(US\$/kwh)$	0,0587	(Calculado pela autora)
$k_{combamb}(kCO_2/kwh)$	0,203	(CARBON INDEPENDENT, 2014)

Tabela 4: Dados para o óleo diesel.

Dado	Óleo diesel	Fonte
$tar_{comb}(US\$/kg)$	0,894	(ANP, 2014)
$PCI(kJ/kg)$	39203,3	(ANP, 2014)
$k_{combfin}(US\$/kwh)$	0,0821	(Calculado pela autora)
$k_{combamb}(kCO_2/kwh)$	0,245	(CARBON INDEPENDENT, 2014)

Tabela 5: Dados das tarifas elétricas de consumo e demanda no horário de ponta e fora de ponta.

Dado	Tarifa (US\$/kWh)	Fonte
k_{consHP}	0,20	(CELPE, 2015)
k_{consFP}	0,13	(CELPE, 2015)
k_{demHP}	4,94	(CELPE, 2015)
k_{demFP}	2,17	(CELPE, 2015)

Note que existe uma diferenciação nas taxas para horário de ponta e fora de ponta. O horário de ponta é um período de 2h no qual o consumo de energia elétrica é maior, das 18 às 20h, nas indústrias e residências, isso requer uma carga maior da rede de distribuição para suprir esta demanda, por isso essa diferenciação. Além disso as companhias de distribuição de energia calculam o custo energético com base no consumo ao longo do dia e com base na demanda máxima requerida durante aquele mesmo dia, para assim calcular o custo efetivo, para um maior detalhamento desse diferenciação consultar Freitas, 2016.

Tabela 6: Emissão de CO₂ para a produção de energia elétrica em função da matriz energética.

Dado	Emissão (kgCO ₂ /kWh)	Fonte
$k_{eeHIDREL}$	0,445	(CELPE, 2015)
k_{eeTERM}	0,527	(CARBON INDEPENDENT, 2014)

Para cada equipamento utilizado tem-se um custo financeiro com a aquisição, assim como um impacto ambiental que aquela máquina provocou para ser produzida. Os custos financeiro e ambiental dos equipamentos são mostrados na tabela 7.

Tabela 7: Custo de investimento financeiro e ambiental dos equipamentos.

Dado	Equipamento	Custo financeiro (US\$/kW)	Custo ambiental (10 ⁻⁶ US\$/kW)	Fonte
k_{invmot}	Motogerador	413	138,8*	(BARBOSA; FONTES; ALMEIDA, 2009)
k_{invcg}	Cald. a Gás	126	14,4*	(STYRELSEN, 2012)
k_{invcr}	Cald. de Recuperação	220	25,5*	(TEIXEIRA; OLIVEIRA, 2001)
k_{invce}	Cald. Elétrica	233	16,8*	(STYRELSEN, 2012)
k_{invca}	Chiller de Absorção	863	43,6*	(BARBOSA; FONTES; ALMEIDA, 2009)

k_{invcc}	Chiller de Compressão	705	31,4*	(BARBOSA; FONTES; ALMEIDA, 2009)
k_{invde}	Distr. de Eletricidade	78	0,1*	(WILLIS, 2004)
k_{invdv}	Distr. de Vapor	50	0,1*	(WILLIS, 2004)
k_{invred}	Rede Elétrica	41	0,1*	(WILLIS, 2004)
k_{invcom}	Rede de Comb.	145	0,1*	(WILLIS, 2004)

*Custos de investimento ambientais foram extraídos de Hornsby, 2014.

O rendimento dos equipamentos é outro parâmetro necessário para a simulação computacional correta do sistema, esses valores são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 8: Rendimento dos equipamentos.

Dado	Descrição	Eficiência	Fonte
η_{mot_term}	Rend. Térmico Motogerador	0,40	(WILLIS, 2004)
η_{mot_elet}	Rend. Elétrico Motogerador	0,35	(WU; WANG, 2006)
η_{cg}	Rend. Caldeira a Gás	0,85	(XIE et al., 2007)
η_{cr}	Rend. Caldeira de Recuperação	0,80	(TEIXEIRA; OLIVEIRA, 2001)
η_{ce}	Rend. Caldeira Elétrica	0,98	(XIE et al., 2007)
COP_{ca}	COP Chiller de Absorção	0,6	(WU; WANG, 2006)
COP_{cc}	COP Chiller de Compressão	2,6	(MACEDO, 2007)

O suprimento da demanda requerida traz um ganho financeiro ao sistema, ou seja, existe para cada kW de energia, vapor ou água gelada gerado um preço associado que deve ser incluído na função objetivo. Como pôde ser observado na figura 2 o excesso de energia pode ser ocasionalmente vendido (ponto 11), ocorrendo assim ganho sobre a venda interna (ganho com o suprimento) e externa (ganho com a venda de excedente) de energia. Para o vapor e a água gelada não foi associado um ganho com a venda de excedente.

Em termos ambientais esse ganho não se aplica, pois, não existe um ganho ambiental com a emissão de CO₂. Os preços de venda são apresentados na tabela 9. Esses valores foram calculados parametrizando o dado em questão e verificando qual valor do dado retornava o VPL igual a 0 em sistemas sem cogeração. Assim, teríamos o valor de equilíbrio das entradas e saídas.

Tabela 9: 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	0,153
$k_{vendaEXT}$	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

Por fim, foi necessário determinar a potência dos equipamentos que seriam consideradas para a otimização. Foram escolhidos seis valores possíveis para a potência nominal do motor (N_{motor}) e para a potência nominal da rede (N_{rede}); cinco valores para a potência nominal da caldeira a gás (N_{cg}) e caldeira de recuperação (N_{cr}); três valores para a potência nominal da caldeira elétrica (N_{ce}), do chiller de compressão (N_{cc}) e do chiller de absorção (N_{ca}). Com a combinação desses valores, tem-se um total de 24.300 configurações físicas distintas para o sistema disponível para a escolha durante a otimização. Essa riqueza de possibilidade físicas e operacionais que possibilitam bons resultados com a utilização da métrica combinada (estudo de caso 1) e da variação da taxa do crédito de carbono (estudo de caso 2). Esses valores foram escolhidos em função das demandas máximas de energia elétrica, vapor e água gelada. A tabela 10 apresenta os valores de potência nominal possíveis para cada equipamento.

Tabela 10: Potência nominal dos equipamentos utilizadas.

Equipamento	Potência nominal (kW)					
N_{motor}	0	1800	2000	2500	2800	3000
N_{rede}	0	1500	2000	2500	3000	4000
N_{cg}	0	3000	4500	5000	5600	
N_{cr}	0	3000	4000	4500	5000	
N_{ce}	0	5000	5600			
N_{cc}	0	1675	3350			
N_{ca}	0	1675	3350			

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

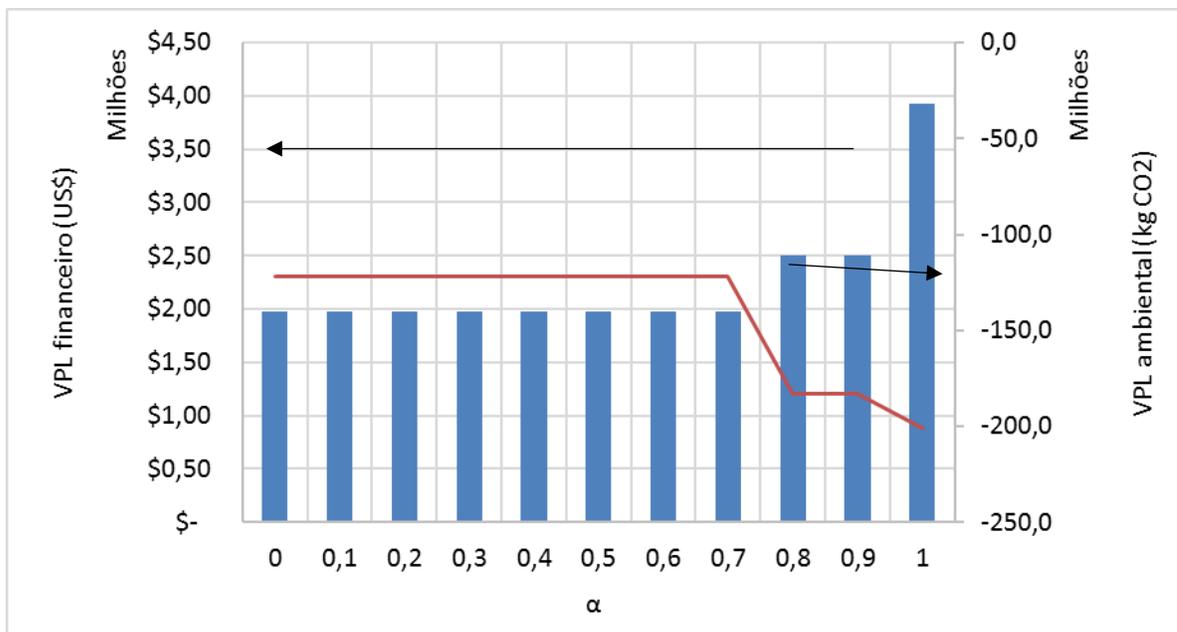
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos estudos de caso 1 e 2, o foco principal será explorar as modificações nas configurações físicas e operacionais do sistema otimizado em decorrência da variação dos parâmetros e acompanhar o impacto financeiro e ambiental.

5.1 Estudo de caso 1: impacto da variação do alpha na otimização de sistemas térmicos

Neste estudo foi analisada a influência do fator α sobre um sistema otimizado objetivando a maximização do $VPL_{combinado}$ e o monitoramento da métrica financeira e ambiental. O fator variou de 0 a 1 com um passo de 0,1.

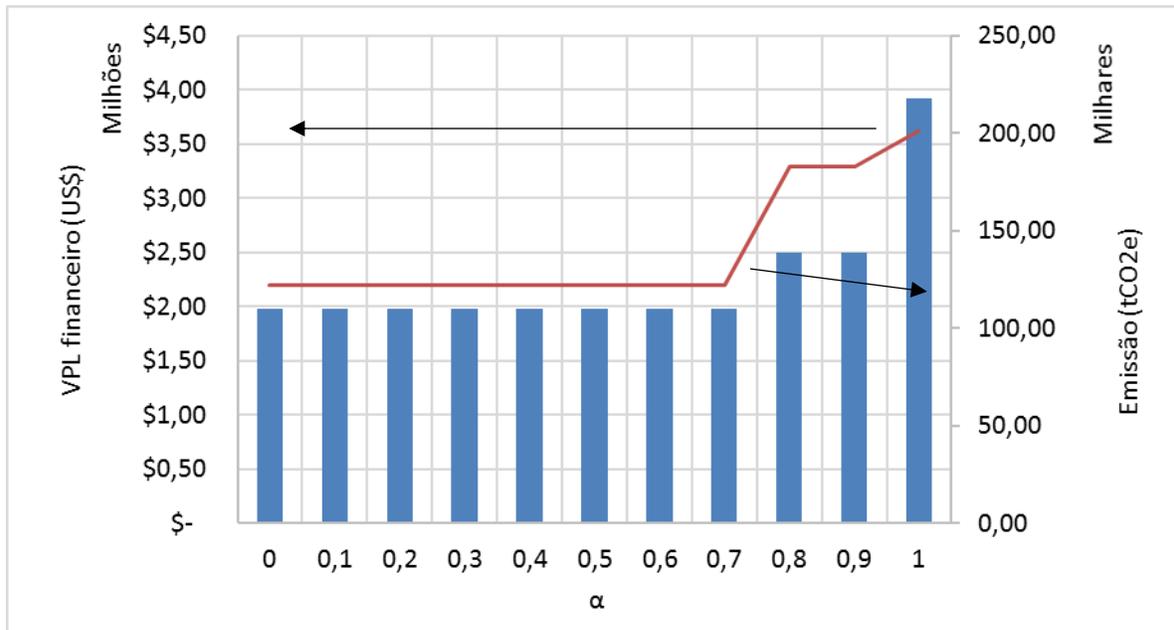
Na figura 5 é possível observar o valor presente líquido financeiro (US\$) e o ambiental (kgCO₂) em função de α , a figura 6 traz no lugar do VPL_{amb} a emissão do sistema em tCO_2e e a tabela 11 mostra as potências de cada equipamento, o VPL_{fin} , o VPL_{amb} em módulo e mostra se houve ou não mudança física ou operacional com a mudança do fator.

Figura 5: Variação do VPL financeiro e ambiental em função do α .



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 6: Variação do VPL financeiro e da emissão de CO₂ em toneladas em função do α .



Fonte: Elaborado pela autora

Note que com o α variando de 0 a 0,7 não houve nenhuma alteração física ou operacional na configuração do sistema. O sistema operou com um motor de 3000 kW, uma potência da rede de 1500 kW, chiller de compressão de 3350 kW, utilizou uma caldeira de recuperação de 3000 kW e caldeira elétrica de 5000 kW. Obtendo assim um retorno financeiro com a operação do sistema de 1,98 milhões de dólares e uma emissão de 122 mil tCO₂e.

Para α variando de 0,8 a 1 houve duas mudanças físicas quando comparado ao sistema otimizado com α variando de 0 a 0,7, a caldeira a gás que não estava sendo utilizada anteriormente passou a ser utilizada e com uma potência nominal de 3000 kW e a caldeira elétrica não foi mais utilizada. De 0,7 para 0,8 em decorrência da nova configuração do sistema houve um aumento de 26,3% no retorno financeiro, em contrapartida houve um aumento de 49,9% na emissão de CO₂. De 0,9 para 1 mesmo não ocorrendo mudança física, houve uma mudança operacional que será melhor explorada no final deste tópico.

Tabela 11: Dados referentes a operação do sistema e os respectivos VPLs em função do α .

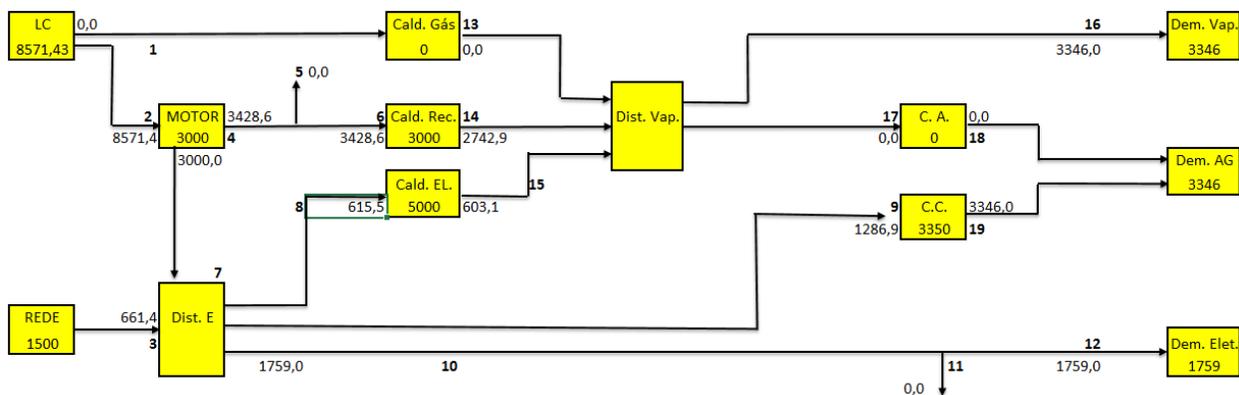
A	Potência dos equipamentos (kW)							Mudança		VPL	
	GMG	REDE	CC	CA	CG	CE	CR	Fís.	Oper.	Financ. (10 ⁶ US\$)	Amb. (10 ³ tCO _{2e})
0,0	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,1	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,2	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,3	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,4	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,5	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,6	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,7	3000	1500	3350	0	0	5000	3000	NÃO	NÃO	1,98	122,12
0,8	3000	1500	3350	0	3000	0	3000	SIM	SIM	2,50	183,09
0,9	3000	1500	3350	0	3000	0	3000	NÃO	NÃO	2,50	183,09
1,0	3000	1500	3350	0	3000	0	3000	NÃO	SIM	3,92	201,21

Como mostrado na metodologia, a demanda de energia elétrica, vapor e água gelada varia tanto em função da hora quanto em função do dia da semana. Tem-se 24 demandas horárias representando os dias úteis, 24 demandas representando a exigência do sábado e 24 mostrando as exigências do domingo. Existe um horário em especial onde a demanda tanto de energia elétrica, quanto de vapor e água gelada é a máxima exigida pelo processo. Este horário de demanda máxima ocorre às 19h dos dias úteis (ver variação horária da demanda na primeira tabela do apêndice – tabela A1) onde há uma demanda de 1759 kW de energia elétrica, e 3346 kW de água gelada e vapor. Por ser o horário de demanda máxima das três exigências esse foi o tempo escolhido para representar a forma de operação do sistema. Pois, diante da riqueza de possibilidades físicas e operacionais, como pôde ser mostrado no parágrafo anterior, foi necessário estabelecer um escopo para a comparação entre a forma de operação do sistema otimizado de um certo valor de α em relação a outro valor. Vale salientar que o tempo 19 não é, necessariamente, o de maior exigência operacional dos equipamentos simultaneamente. Pois, há outros horários, cuja demanda não é a máxima e um certo equipamento opera fornecendo a máxima potência possível em função do seu rendimento.

O algoritmo implementado no MATLAB, extraía os dados de saída para uma planilha no Excel permitindo que fosse possível monitorar o valor das variáveis de decisão (x 's) em função do α e em função do horário da operação. Com o objetivo de entender melhor o porquê da mudança física na configuração do sistema otimizado quando o peso da métrica financeira passou de 70 para 80% e o peso da métrica ambiental caiu de 30 para 20%, respectivamente; as figuras 7 e 8 mostram a operação do sistema otimizado para o tempo 19 para α igual a 0,7 e α igual a 0,8. Note que para este ponto a exigência elétrica e térmica do motor é a mesma, assim como a operação da caldeira de recuperação e o chiller de compressão. Apenas a operação da rede que mudou com a retirada da caldeira elétrica e a inclusão da caldeira a gás. Isso porque a caldeira a gás necessita de combustível para operar e a caldeira elétrica demanda energia elétrica.

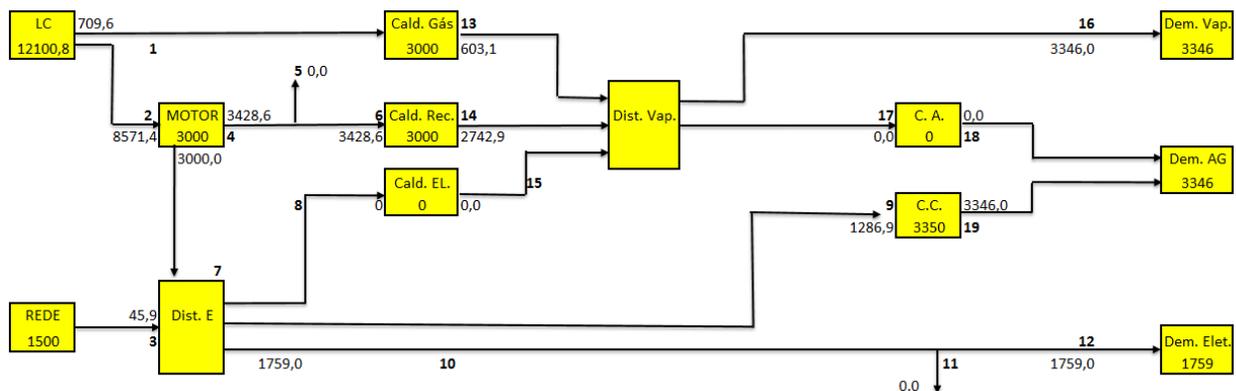
Quando a métrica financeira influenciava em 80% a otimização do $VPL_{combinado}$ foi mais satisfatório diminuir a quantidade de energia elétrica solicitada da rede e aumentar o consumo de combustível. Assim a adição da caldeira a gás e remoção da caldeira elétrica diminuiu em 93,1% a exigência de eletricidade do sistema, como o custo de eletricidade é maior, essa diminuição trouxe um retorno financeiro satisfatório. Porém, o consumo de combustível aumentou bastante, aumentando consequentemente a emissão de CO_2 do sistema.

Figura 7: Operação do sistema otimizado para α igual a 0,7 no tempo 19.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 8: Operação do sistema otimizado para α igual a 0,8 no tempo 19.

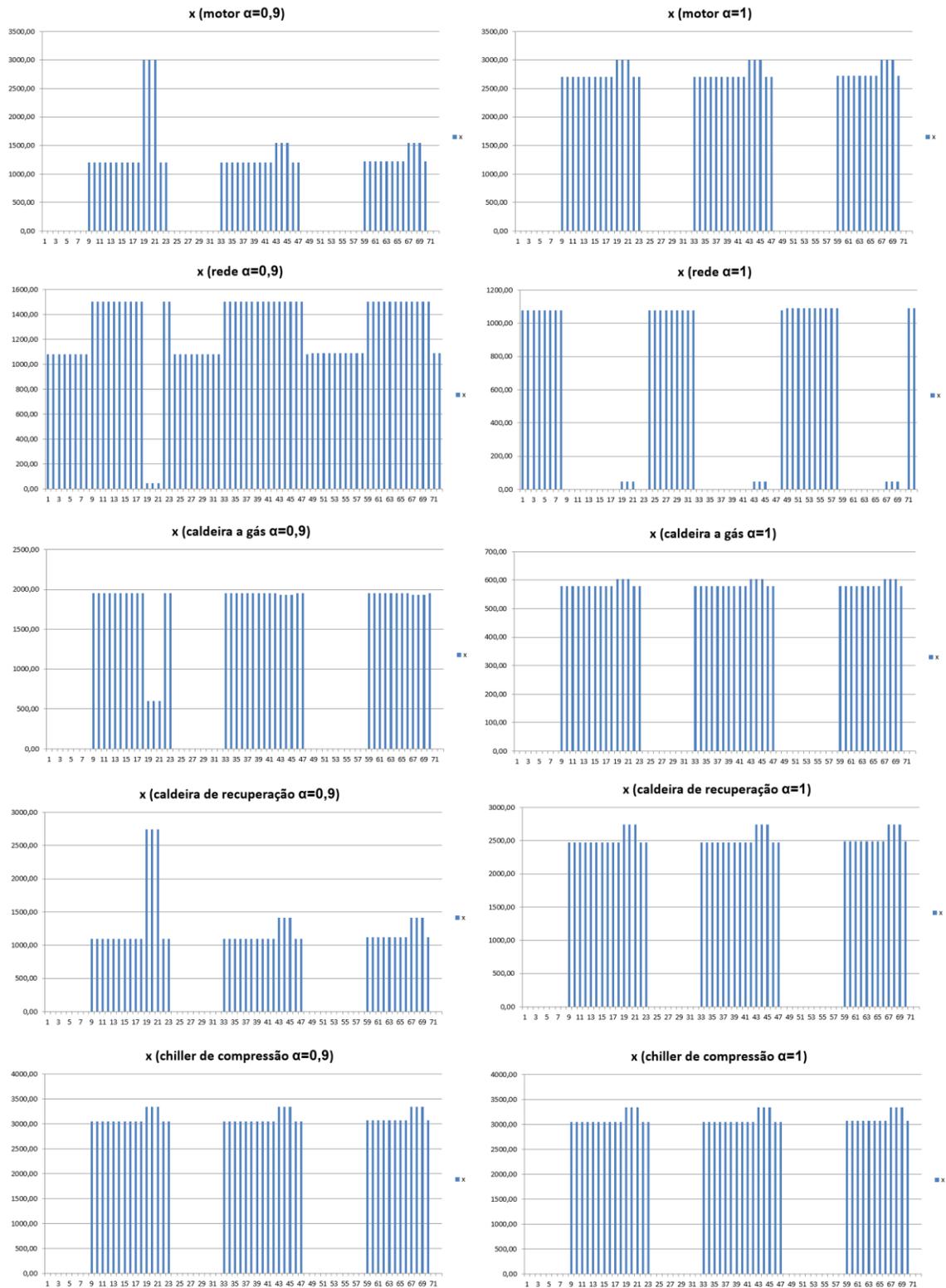


Fonte: Elaborado pela autora

Enfim, chega-se ao último ponto da tabela, onde α é igual a 1, observou-se que a forma de operação do sistema otimizado deste ponto diferia da operação para α igual a 0,9. Foi diferente o modo de operação para o motor, rede, caldeira a gás e caldeira de recuperação, apenas a operação do chiller de compressão permaneceu a mesma, como pode ser visto na figura 9.

A figura 9 mostra a potência operacional de cada um dos 5 equipamentos em função do tempo para α igual a 0,9 e 1. Essa mudança operacional conferiu um aumento de 56,8% na receita em relação ao ponto anterior e um aumento de 9,9% na emissão de CO_2 . Na figura é possível verificar que a exigência de combustível aumenta bastante em diversos pontos do gráfico de 0,9 para 1, já o consumo de energia elétrica cai. Por esse motivo houve aumento na receita devido a otimização focar 100% na métrica financeira e consequente aumento na emissão de poluentes, já que não houve foco nenhum na métrica ambiental.

Figura 9: Comparação entre o modo de operação dos equipamentos α igual a 0,9 e 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Estudo de caso 2: impacto da variação do gama na otimização de sistemas térmicos

5.2.1 Estabelecendo a linha de base

O objetivo principal desta etapa foi calcular a linha de base, em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e). O sistema escolhido, apresentado no tópico 4.5.1, foi simulado considerando um suprimento de energia elétrica através de termelétrica ou hidrelétrica e um suprimento de combustível através do uso do gás natural ou óleo diesel. Isso porque o tipo de fonte de energia que deve ser considerada para o cálculo da linha de base não é um parâmetro pré-estabelecido pelo MDL; assim quatro cenários foram simulados. A tabela 12 mostra o valor da emissão para esses cenários e a figura 10 mostra qual a potência dos equipamentos que foram necessárias para suprir a demanda.

Tabela 12: emissão do sistema escolhido como base, em função da fonte de energia.

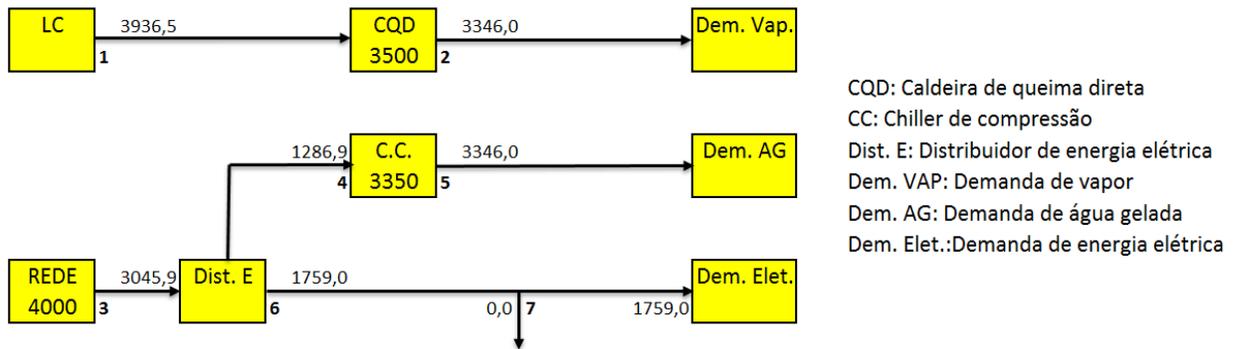
Fonte de energia		Emissão
Energia elétrica	Combustível	(tCO ₂ e)
Hidrelétrica	Gás natural	239.973,0
Hidrelétrica	Óleo diesel	255.713,1
Termelétrica	Gás natural	269.842,2
Termelétrica	Óleo diesel	285.954,7

Apesar da redução na oferta interna de hidroeletricidade nos últimos anos com consequente aumento de geração térmica, seja a gás natural, carvão mineral ou óleo, o Brasil continua tendo uma matriz energética predominantemente hidrelétrica. Mesmo o óleo diesel sendo mais consumido no Brasil do que o gás natural, principalmente no setor de transporte, o gás natural tem registrado um aumento crescente tanto na produção interna quanto no consumo. Sendo incentivado através da viabilização nos setores de transporte, industrial e na produção de energia elétrica.

Assim, como os estudos de caso a seguir simulam o setor de utilidades de uma indústria instalada no Brasil, a linha de base escolhida será a que fornece a emissão de CO₂ de um sistema que utiliza gás natural como combustível e demanda energia elétrica produzida por hidrelétrica. Assim o valor da linha de base será de 239.973tCO₂e.

Na figura 10 também é mostrada a potência nominal dos equipamentos necessária para suprir a demanda e a operação para o tempo 19.

Figura 10: configuração do sistema base e sua operação para o tempo 19.



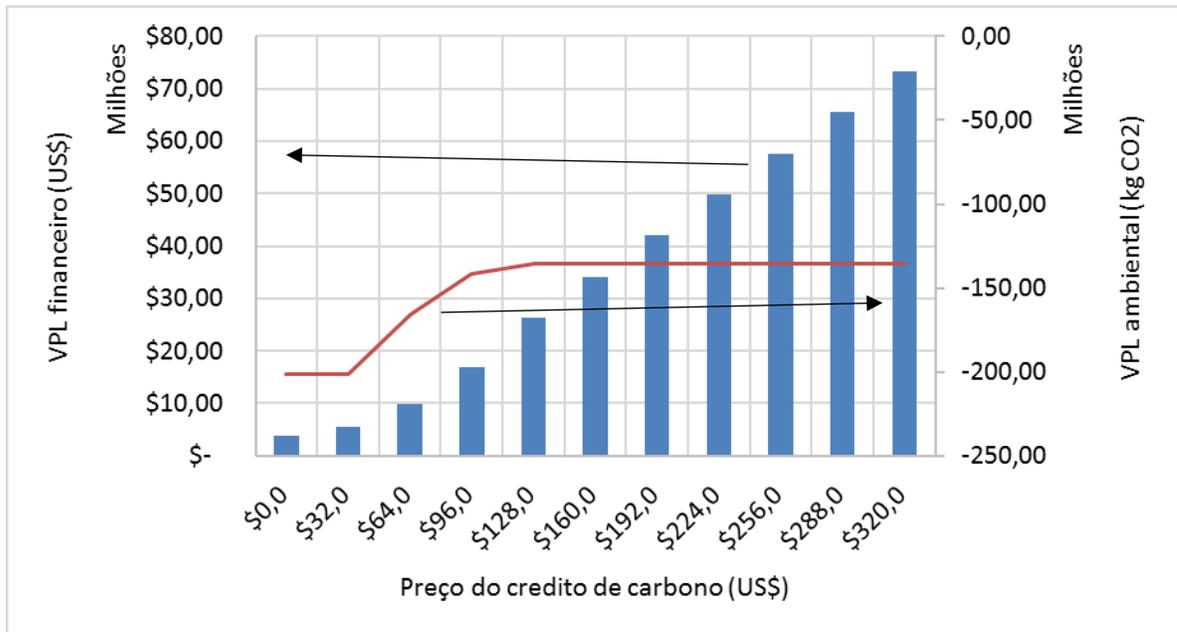
Fonte: Elaborado pela autora

5.2.2 Variação da tarifa do crédito de carbono

Neste estudo foi verificada a influência do valor da tarifa do crédito de carbono, γ , sobre a otimização do sistema genérico focado na métrica financeira (α igual a 1). O γ variou de US\$0 a US\$320 com passo de US\$32. Na figura 11 é possível observar o valor presente líquido financeiro (US\$) e o ambiental (kgCO_2) em função do preço do crédito de carbono, γ , a figura 12 traz no lugar do VPL_{amb} a emissão do sistema em $t\text{CO}_2e$ e a tabela 13 mostra as potências de cada equipamento, o VPL_{fin} , o VPL_{amb} (em módulo) e mostra se houve ou não mudança física ou operacional com a mudança de γ .

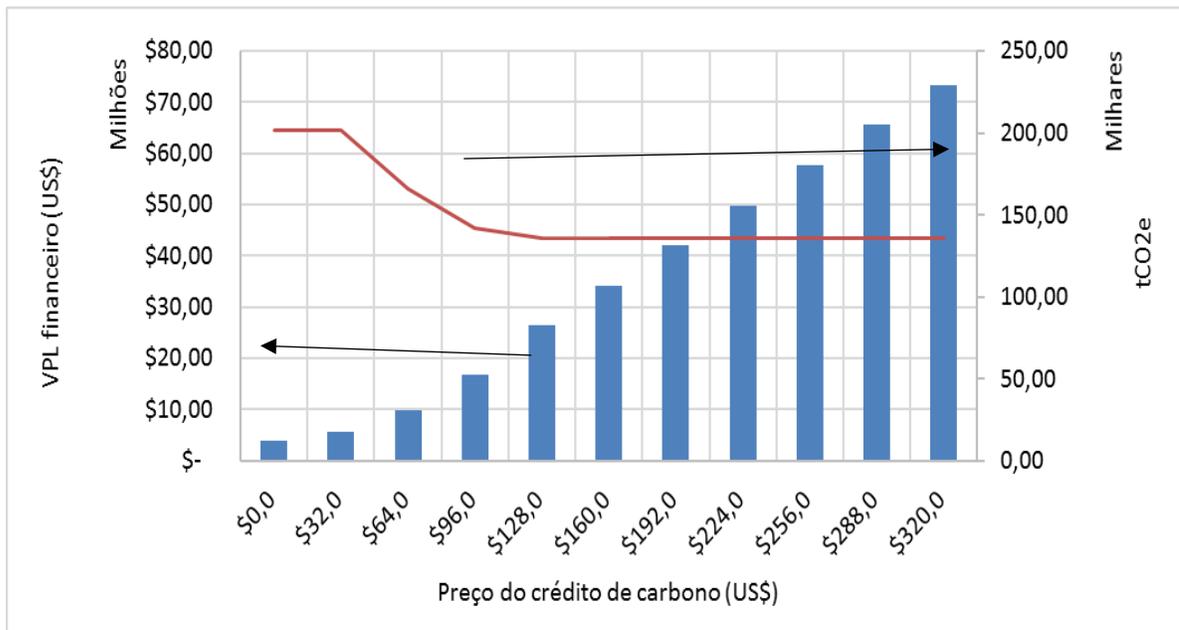
Em linhas gerais é possível observar nas figuras 11 e 12 um aumento crescente no VPL_{fin} a medida que o γ aumenta, isso porque o sistema otimizado sempre emitia menos CO_2 que a linha de base. Assim, quanto maior o γ maior o retorno financeiro associado. Já para o VPL_{amb} , são observadas duas faixas onde o VPL_{amb} é constante (de US\$0 a US\$32 e de US\$128 a US\$320) e uma faixa onde o VPL_{amb} aumenta gradativamente, ou diminui em módulo (de US\$32 a US\$128).

Figura 11: Variação do VPL financeiro e ambiental em função do preço do crédito de carbono.



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 12: Variação do VPL financeiro e da emissão de CO2 em função do preço do crédito de carbono.



Fonte: Elaborada pela autora

Para um melhor entendimento do comportamento observado nas figuras 11 e 12, a seguir serão analisadas as peculiaridades operacionais de cada ponto com o auxílio da tabela 13.

Tabela 13: Dados referentes a operação do sistema e os respectivos VPLs em função da tarifa de crédito de carbono, γ .

γ (US\$)	Potência dos equipamentos (kW)							Mudança		VPL	
	GMG	REDE	CC	CA	CG	CE	CR	Fís.	Oper.	Financ. (10 ⁶ US\$)	Amb. (10 ³ tCO ₂ e)
0,0	3000	1500	3350	0	3000	0	3000	NÃO	NÃO	3,93	201,21
32,0	3000	1500	3350	0	3000	0	3000	NÃO	NÃO	5,63	201,21
64,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	SIM	SIM	9,85	165,81
96,0	0	3000	1675	1675	5600	5000	0	SIM	SIM	16,86	141,53
128,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	SIM	SIM	26,34	135,34
160,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	34,18	135,34
192,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	42,01	135,34
224,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	49,84	135,34
256,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	57,67	135,34
288,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	65,50	135,34
320,0	0	3000	3350	1675	5600	0	0	NÃO	NÃO	73,34	135,34

O primeiro ponto importante a se notar é que o ponto de mínimo da tarifa do crédito de carbono do estudo de caso 2 ($\gamma=0$) é igual ao ponto de máximo do fator no estudo de caso 1 ($\alpha=1$), pois, em ambos a otimização é focada 100% no financeiro e não há a inclusão da possibilidade de venda de crédito de carbono.

Foi observado que quando a tarifa do crédito de carbono varia de 0 a US\$32 o sistema permanece com o mesmo modo de operação e compra os mesmos equipamentos, portanto, não houve nem mudança física, nem mudança operacional. O VPL_{amb} é o mesmo, já o VPL_{fin} muda, pois, antes não havia ganho com a redução de emissão e agora a cada tonelada de CO₂ equivalente reduzida ganha-se US\$32.

Quando a tarifa de crédito de carbono passa de US\$32 para US\$64, o sistema otimizado reduz a potência do motor, aumenta a da rede e da caldeira a gás e para de acionar a caldeira de recuperação. Essa mudança proporcionou ao sistema otimizado um aumento de quase 75% na receita e uma diminuição na emissão em 17,6%. Note que esta mudança física proporcionou uma diminuição do impacto devido a diminuição na demanda de combustível pelo sistema. Por mais que a caldeira a gás utilize combustível o rendimento da caldeira é maior que o rendimento térmico do motor, como pode ser visto na tabela 12 dos dados, necessitando assim de menos combustível para gerar a mesma quantidade de vapor.

Já quando a tarifa de crédito de carbono passa de US\$64 para US\$96, outra grande mudança física ocorre. O sistema deixa de comprar o motor, diminui a potência do chiller de compressão e aumenta a potência da caldeira a gás, em contrapartida ele compra um chiller de absorção e uma caldeira elétrica, essa nova configuração traz uma redução na emissão em 14,6% e um aumento na receita de 71,2%. Com uma caldeira a gás e uma caldeira elétrica maior a geração de vapor aumenta, suprimindo a demanda de vapor e acionando o chiller de absorção, fazendo com que menos energia seja gasta para acionar o chiller de compressão e menos combustível seja consumido pelo fato de não haver motor, mesmo a caldeira a gás e a caldeira elétrica necessitando de combustível e eletricidade, respectivamente.

A última mudança física no sistema ocorre quando a tarifa de crédito de carbono passa de US\$96 para US\$128. Nesta transição o sistema otimizado opera com um chiller de compressão maior e novamente deixa de comprar a caldeira elétrica. Essa mudança trouxe uma queda na emissão de 4,4% e um aumento na receita de 56,3%. Como a caldeira elétrica deixou de ser utilizada a oferta de vapor diminui, diminuindo a capacidade do chiller de absorção de gerar água gelada, isso é compensado pelo aumento na potência do chiller de compressão, este, por sua vez, necessita de mais energia o que aumenta a necessidade elétrica, esse é um dos motivos que explicam porque a taxa de redução da emissão de CO₂ caiu de 14,6 para 4,4%.

De US\$128 em diante o sistema otimizado opera com os mesmos equipamentos e de mesmo modo em função do tempo, fazendo com que a emissão de CO₂ não mude. Esse resultado mostra que a partir de US\$128, para essas condições operacionais e de demanda, o aumento na tarifa de crédito de carbono não é capaz de direcionar uma nova configuração física ao sistema, muito provavelmente por conta dos custos associados a essa mudança e/ou por conta das possibilidades de equipamentos disponíveis para a otimização. Como sugestão para trabalhos futuros pode-se fazer a mesma simulação com uma quantidade maior de potências nominais para cada equipamento e verificar o comportamento do sistema otimizado com a variação da tarifa. Como a tarifa continua a crescer, o retorno financeiro cresce gradativamente também, porém, numa taxa cada vez menor.

Para fins de avaliação do modo de operação do sistema otimizado que provocaram as mudanças físicas mais relevantes do estudo, é possível observar no apêndice como cada um dos 7 equipamentos operam quando a tarifa de crédito de carbono é igual a US\$0 (figura A1), igual a US\$64 (figura A2), igual a US\$96 (figura A3) e igual a US\$128 (figura A4).

De modo geral, foi possível observar que os ganhos financeiros foram bastante expressivos com a adequação do sistema as exigências do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL e conseqüentemente com a possibilidade de venda de créditos de carbono e trouxeram também um bom compromisso com a métrica ambiental. Foi nítida a necessidade de aumento da tarifa para direcionar o sistema para uma configuração que trouxesse menor emissão de dióxido de carbono.

6 CONCLUSÕES

Foi possível concluir que para a otimização efetiva de um sistema térmico que tem como finalidade atender a uma demanda de energia específica é importante considerar um grande número de opções físicas e operacionais. Não há um único sistema ideal que atenda todos os casos, pois, isso depende das demandas, das fontes utilizadas, das tarifas e de muitos outros parâmetros, mas, acima de tudo, depende da escolha da métrica utilizada como função objetivo.

Foi verificado também que uma otimização financeira e uma ambiental realizadas separadamente trazem resultados bem distintos, pois, geralmente, os sistemas mais rentáveis financeiramente são os que emitem mais.

O primeiro estudou combinou a métrica financeira e a ambiental numa otimização que avaliasse como o sistema otimizado se comportaria com a variação do peso ou relevância de uma métrica em relação a outra (estudo de caso 1 – variação de α). Já no segundo houve a adição de uma variável que tem por essência cunho tanto financeiro quanto ambiental, a tarifa de crédito de carbono, para que fosse possível verificar qual o poder desta variável num contexto de métricas com sentidos tão opostos (estudo de caso 2 – variação de γ).

O estudo de caso 1 mostrou que a combinação da métrica financeira com a ambiental através do fator α trouxe resultados interessantes, tais como:

- Caso o projeto do sistema vise uma baixa emissão de poluentes atrelado a uma receita razoável, o peso para métrica financeira pode variar de 0 a 70% sem que haja aumento na emissão;
- Se o foco for um projeto que tenha um retorno financeiro maior e não seja o mais poluente, o peso da métrica financeira deve ficar entre 70 e 90%;
- Observou-se ainda possibilidade de um aumento de mais de 55% na receita, porém, aumentando a emissão de CO₂ em 10%, para isso o sistema deveria ser otimizado 100% pelo financeiro.

Já no estudo de caso 2, houve a comprovação efetiva do poder da tarifa de crédito de carbono em direcionar a otimização para sistemas mais limpos, ou seja, sistemas que emitam uma quantidade

menor de dióxido de carbono na atmosfera do que uma linha base. Além dos ganhos ambientais essa tarifação traz retornos financeiros atrativos para as indústrias que se adequam aos critérios do MDL e recebem autorização para entrar no comércio de crédito de carbono.

Para as exigências do sistema, os resultados do estudo de caso 2 mostraram que:

- Uma tarifa de crédito de carbono de até US\$32 não é capaz de direcionar a otimização para sistemas mais limpos;
- A partir de US\$32 mudanças na configuração do sistema são observadas, associadas a queda na emissão de CO₂ e aumento na receita. Esse aumento da receita e queda da emissão se observa até que o valor da tarifa chegue a US\$128;
- A partir de US\$128, por mais que a tarifa aumente, o sistema não apresentou nenhuma mudança na sua configuração ótima, sendo observada a mesma taxa de emissão de CO₂ mesmo com o valor da tarifa sendo de US\$320.

Apesar das mudanças físicas e operacionais observadas no sistema otimizado em função da variação paramétrica das variáveis α e γ , os estudos realizados não mostraram uma riqueza maior de adaptações do sistema otimizado para conferir valores melhores de VPL. Esse fato pode ser justificado pela quantidade de equipamentos simulada e pelos dados técnicos apresentados, pois, quanto maior a quantidade de equipamentos disponíveis, maior a possibilidade de reorganização do sistema para conferir melhores valores de VPL.

Esperava-se também que a medida que o valor de γ aumentasse o sistema otimizado no estudo de caso 2 se aproximasse do sistema otimizado no estudo de caso 1 para α igual a zero, porém, isso não aconteceu. Novamente a limitação da quantidade de equipamentos disponíveis é uma justificativa, além disso, essa aproximação entre os sistemas ótimos nos dois casos pode ocorrer para valores de γ muito acima do valor máximo de US\$320 simulado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A inclusão da tarifa de crédito de carbono como variável chave no processo de otimização de sistemas considerando métricas financeiras e ambientais é recente. Assim, durante o desenvolvimento da pesquisa foram surgindo questões adicionais e análises interessantes que poderiam ser feitas para somar e aprofundar os estudos do tema em questão, com isso é possível sugerir temas para trabalhos futuros. A seguir, serão expostas algumas dessas sugestões para próximas pesquisas:

- Realizar para o sistema genérico os mesmos estudos de caso dessa dissertação com uma quantidade ainda maior de possibilidades físicas (várias potências nominais por equipamento) e fazer a comparação entre os estudos de caso 1 e 2 para os pontos extremos;
- Buscar ainda mais informações sobre os critérios da Agência Nacional Designada para a aprovar um projeto dentro do MDL e adequar o sistema genérico a essas exigências;
- Pesquisar artigos publicados recentemente que tratem diretamente sobre o MDL, o comércio de créditos de carbono e as melhorias para os sistemas;
- Acompanhar as publicações da Comissão Interministerial de Mudanças Climáticas sobre o tema, buscando fontes de dados ambientais e financeiros mais confiáveis e mais próximos da realidade do que é utilizado nas indústrias, para que sejam implementados nas simulações;
- Realizar os mesmos estudos com dados de combustíveis renováveis, como etanol e biodiesel e fontes de energia renováveis, como eólica e solar, assim como a nuclear;
- Fazer o levantamento de dados de demanda para o sistema de utilidades de uma indústria instalada em Pernambuco e buscar os dados financeiros e ambientais utilizados pelas mesmas, assim como a potência nominal dos equipamentos;
- Simular o sistema acima computacionalmente e realizar os mesmos estudos de caso mostrados nesta dissertação com um grande número de possibilidades físicas (várias potências nominais por equipamento);

REFERÊNCIAS

ABRIL. **Nicholas Stern: uma economia de baixo carbono é possível.** Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/conteudo_398476.shtml>. Acesso em: 8 abr. 2016.

ALBUQUERQUE, L. **ANALISE CRÍTICA DAS POLÍTICAS PÚBLICAS EM MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DOS COMPROMISSOS NACIONAIS DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

ANP. **Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/component/content/article?id=868>>. Acesso em: 19 maio. 2015.

ARAUJO, A. C. P. **Como comercializar créditos de carbono.** 6^a ed. São Paulo: Trevisan Editora Universitária, 2008.

BARBOSA, C. R.; FONTES, F. A.; ALMEIDA, I. M. **Uma análise técnico-econômica de cogeração com termoacumulação aplicada ao setor terciário** 9^o Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecânica, , 2009.

CARBONINDEPENDENT. **Home energy sources.** Disponível em: <http://www.carbonindependent.org/sources_home_energy.html#h7>. Acesso em: 19 maio. 2015.

CELPE. **Tabela de tarifas** Superintendência de Regulação - SRE, , 2015.

CHO, H. et al. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. **Applied Energy**, v. 86, n. 12, p. 2540–2549, 2009.

COPERGÁS. **Copergás|Tarifas.** Disponível em: <<https://www.copergas.com.br/atendimento-aocliente/tarifas/#.WJ5obPkrLIV>>. Acesso em: 19 maio. 2015a.

COPERGÁS. **Copergás|Industrial.** Disponível em: <https://www.copergas.com.br/produtos/industrial/#.WJ5p3_krLIV>. Acesso em: 19 maio. 2015b.

DIETZSCH, L. et al. **Perguntas e Respostas Sobre Aquecimento Global.**

DUBASH, N. K. et al. Developments in national climate change mitigation legislation and strategy. **Climate Policy**, v. 13, n. 6, p. 649–664, nov. 2013.

ESTADÃO. **COP-20 aprova base para novo acordo climático - Sustentabilidade - Estadão.** Disponível em: <<http://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,cop-20-aprova-base-para-novo-acordo-climatico,1606843>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

FREITAS, L. A. **Estudo Energético e Econômico de Sistemas Térmicos de Fornecimento de Eletricidade e Água Gelada: o Caso dos Shopping Centers de Pernambuco.** Recife, PE:

Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

G1NATUREZA. **Até 2015, tonelada de CO2 deve custar US\$ 32 para conter emissões.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2014/06/tonelada-de-co2-tem-que-custar-us-32-ate-2015-para-conter-aquecimento.html>>. Acesso em: 20 maio. 2016.

G1NATUREZA. **Cientistas pedem ação urgente sobre clima ao fim de cúpula em Paris.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/07/cientistas-pedem-acao-urgente-sobre-clima-ao-fim-de-cupula-em-paris.html>>. Acesso em: 20 maio. 2016a.

G1NATUREZA. **Projetos para “precificar” CO2 dobram em três anos, diz Banco Mundial.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/09/projetos-para-precificar-co2-dobram-em-tres-anos-diz-banco-mundial.html>>. Acesso em: 20 maio. 2016b.

G1NATUREZA. **Mudança do clima tem que ser questão de estado, sugere estudo.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/07/mudanca-do-clima-tem-que-ser-questao-de-estado-sugere-estudo.html>>. Acesso em: 20 maio. 2016c.

G1NATUREZA. **COP 22 chega ao último dia sem avanços expressivos nas negociações climáticas | Natureza | G1.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/cop-22-chega-ao-ultimo-dia-sem-avancos-expressivos-nas-negociacoes-climaticas.ghtml>>. Acesso em: 10 jan. 2017a.

G1NATUREZA. **Natureza - Expectativa na COP 22 é que Trump não mine acordo do clima.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2016/11/expectativa-na-cop-22-e-que-trump-nao-mine-acordo-do-clima.html>>. Acesso em: 10 jan. 2017b.

GLOBO NEWS. **Cidades e Soluções - Cidades e Soluções faz um balanço final da COP21 | Globosat Play, 2015.** Disponível em: <<http://globosatplay.globo.com/globonews/v/4676125/>>. Acesso em: 5 mar. 2016

GÓES, H. C. DE A. **ANÁLISE COMPARATIVA DE INSTRUMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE EM UNIVERSIDADES VISANDO UMA PROPOSTA PARA O BRASIL.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

GUERRA, M. R. **OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO FLEXÍVEIS USANDO MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.** Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

GURGEL, A. C.; PALTSEV, S. Costs of reducing GHG emissions in Brazil. **Climate Policy**, v. 14, n. 2, p. 209–223, 4 mar. 2014.

HENRIQUES, M. F. J. **POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO USO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL BRASILEIRO.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research.** 8. ed. New York: Mc Graw Hill Higher Education, 2005.

HORNSBY, E. M. **Adaptive Systems for the Generation of Electricity , Steam and Chilled Water : Optimization Considering Financial and Environmental Metrics**. Recife, PE: Federal University of Pernambuco, 2014.

HORNSBY, E. M. et al. Combined Financial-Environmental Metric for Thermal Systems Optimization. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, 2017.

IPCC. Sumário para os Tomadores de Decisão do Quinto Relatório de Avaliação (2014). n. 2014, p. 47, 2014.

IPCC. **Working Group II**. Disponível em: <<http://www.ipcc-wg2.awi.de/>>. Acesso em: 19 set. 2015.

LA ROVERE, E. L. et al. Brazil beyond 2020: from deforestation to the energy challenge. **Climate Policy**, v. 13, n. sup01, p. 70–86, mar. 2013.

LA ROVERE, E. L. et al. Climate change mitigation actions in Brazil. **Climate and Development**, v. 6, n. sup1, p. 25–33, 30 abr. 2014.

LACERDA, G. et al. TECHNICAL AND FINANCIAL OPTIMIZATION OF A COGENERATION PLANT IN A SUGAR AND ALCOHOL PLANT WORKING WITH. n. 2004, 2009.

LACHTERMARCHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisão**. 4. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2009.

LEONHARDT, R. D.; STUMP, D. **Leilão do Banco Mundial movimenta mercado de carbono**. Disponível em: <<http://www.migalhas.com.br/dePeso/16,MI221887,91041-Leilao+do+Banco+Mundial+movimenta+mercado+de+carbono>>. Acesso em: 14 set. 2016.

LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R. Mudanças do Clima e Economia Verde. **Caminhos para Sustentabilidade, Cadernos Adenauer**, 2012.

MACEDO, N. G. L. **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**. Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

MAGNANI, F. S. et al. Adaptability of optimized cogeneration systems to deal with financial changes occurring after the design period. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 183–193, 2013.

MAGNANI, F. S.; MELO, N. R. DE. Use of the task configuration system (TCS) for the design and on-line optimization of power plants operating with variable loads. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 2–3, p. 455–461, 2009.

MAGO, P. J.; CHAMRA, L. M. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 10, p. 1099–1106, 2009.

MAGO, P. J.; HUEFFED, A. K. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1628–1636, 2010.

MCTI. RELATÓRIO DA CONFERÊNCIA DAS PARTES EM SUA TERCEIRA SESSÃO. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/17335.html>>. Acesso em: 9 out. 2015.

MELO, N. R. **SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PLANTAS DE MICROCOGERAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UM MÓDULO DE CONFIGURAÇÃO DE TAREFAS PARA A TOMADA DE DECISÃO EM DEMANDAS VARIÁVEIS.** Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MONZONI, M. **Propostas empresariais de políticas públicas para uma economia de baixo carbono no Brasil: processos industriais e tratamento de resíduos.**

MOTTA, R. S. DA et al. O acordo de Copenhague e as decisões de Cancun no contexto da convenção do clima. <http://www.ipea.gov.br>, 2011.

NASCIMENTO, S. V. **Pesquisa Operacional e Análise de Investimentos - sua aplicação na indústria e nos serviços.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2012.

OC. **Observatório do Clima - COP 19: Os resultados.** Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/cop-19-os-resultados-2/>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

OCHOA, A. A. V.; DUTRA, J. C. C.; GUERRERO, J. R. H. **Introdução a análise de sistemas de refrigeração por absorção.** Recife, PE: Editora Universitária da UFPE, 2011.

OLIVEIRA, G. L. B. **Estudo de Viabilidade Técnica e Financeira de Usinas Termelétricas a Várias Pressões, Temperaturas e Potências.** Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

PETRÔNIO, P. S. **ESTUDO DA HABILIDADE DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO EM SUPORTAR VARIAÇÕES FINANCEIRAS.** Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

PIACENTINO, A.; CARDONA, F. EABOT – Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 11, p. 3006–3016, 2008.

RATHMANN, R. **IMPACTOS DA ADOÇÃO DE METAS DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA SOBRE A COMPETITIVIDADE DE SETORES INDUSTRIAIS ENERGOINTENSIVOS DO BRASIL.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

REZVAN, A. T.; GHARNEH, N. S.; GHAREHPETIAN, G. B. Robust optimization of distributed generation investment in buildings. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 455–463, 2012.

RIBAS, R. P. **PERSPECTIVAS DE DEMANDA E EMISSÕES DE CO₂ NO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO FACE ÀS POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO DA MUDANÇA**

DO CLIMA. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ROCHA ET AL. Caderno : Mudança Global do Clima O que está acontecendo com o planeta Terra. 2014.

ROSA, A.; PRIMO, M. **FINANCIAL OPTIMIZATION OF MICRO COGENERATION PLANTS.** 2003.

SCHAEFFER, R. **Adaptação às mudanças climáticas no Brasil: cenários e alternativas.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

SHEIKHI, A.; RANJBAR, A. M.; ORAEE, H. Financial analysis and optimal size and operation for a multicarrier energy system. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 71–78, 2012.

SILVA, M. I. M. T. DA. **ESTUDO DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO BRASILEIRA – ÊNFASE OFFSHORE.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SOUZA, P. F. M. **Metodologias de monitoramento de projetos de MDL: uma análise estrutural e funcional.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

STERN, N. **Relatório Stern: Aspectos Econômicos das Alterações Climáticas.** [s.l.] Governo do Reino Unido, 2006.

STERN, N. **O Desafio Global.** 2006.

STOCKER, T. **Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2013.

STYRELSEN. **Technology Data for Energy Plants Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion.** DenmarkEnergi Styrelsen, , 2012.

TEIXEIRA, M. S.; OLIVEIRA, S. J. Thermo-economic evaluation of cogeneration systems for a chemical plant. **International Journal of Thermodynamics**, p. 157–163, 2001.

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009. 2010.

UNFCCC. **CDM: Methodologies.** Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>>. Acesso em: 26 out. 2016.

VOGT-SCHILB, A.; HALLEGATTE, S.; GOUVELLO, C. DE. Marginal abatement cost curves and the quality of emission reductions: a case study on Brazil. **Climate Policy**, v. 15, n. 6, p. 703–723, 2 nov. 2015.

WANG, J. et al. Sensitivity analysis of optimal model on building cooling heating and power system. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 5143–5152, 2011a.

WANG, J.-J. et al. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 4621–4631, 2011b.

WANG, J.-J.; JING, Y.-Y.; ZHANG, C.-F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm. **Applied Energy**, v. 87, n. 4, p. 1325–1335, 2010.

WILLIS, H. L. **Power distribution planning reference book** CRC press, , 2004.

WU, D. W.; WANG, R. Z. Combined cooling, heating and power: A review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 32, n. 5, p. 459–495, 2006.

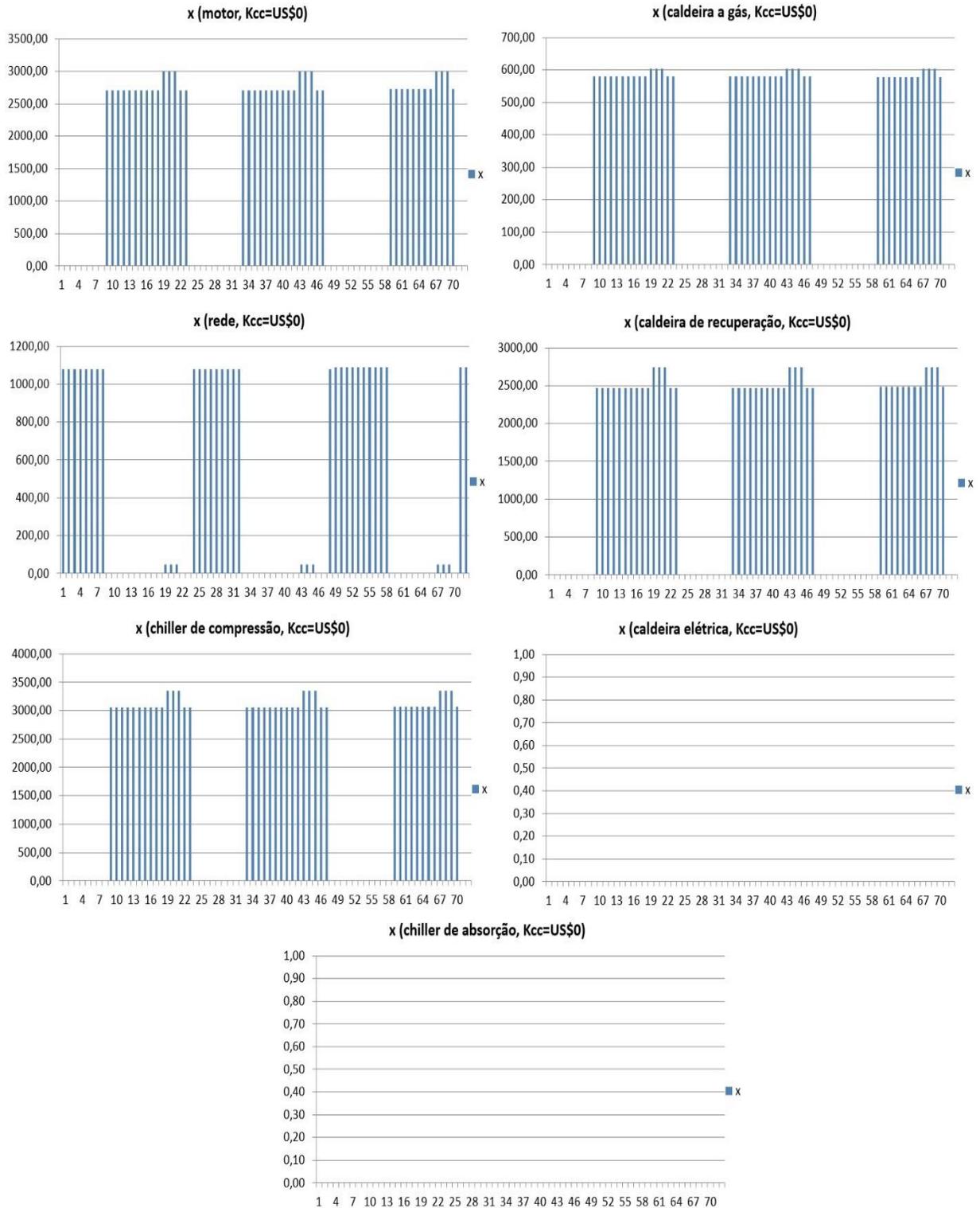
XIE, Y. et al. Performance of Cogeneration System Incorporating Gas Engine Driven Heat Pump. In: **Challenges of Power Engineering and Environment**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 61–63.

APÊNDICE

TABELA A1: demandas horárias de energia elétrica, vapor e água gelada.

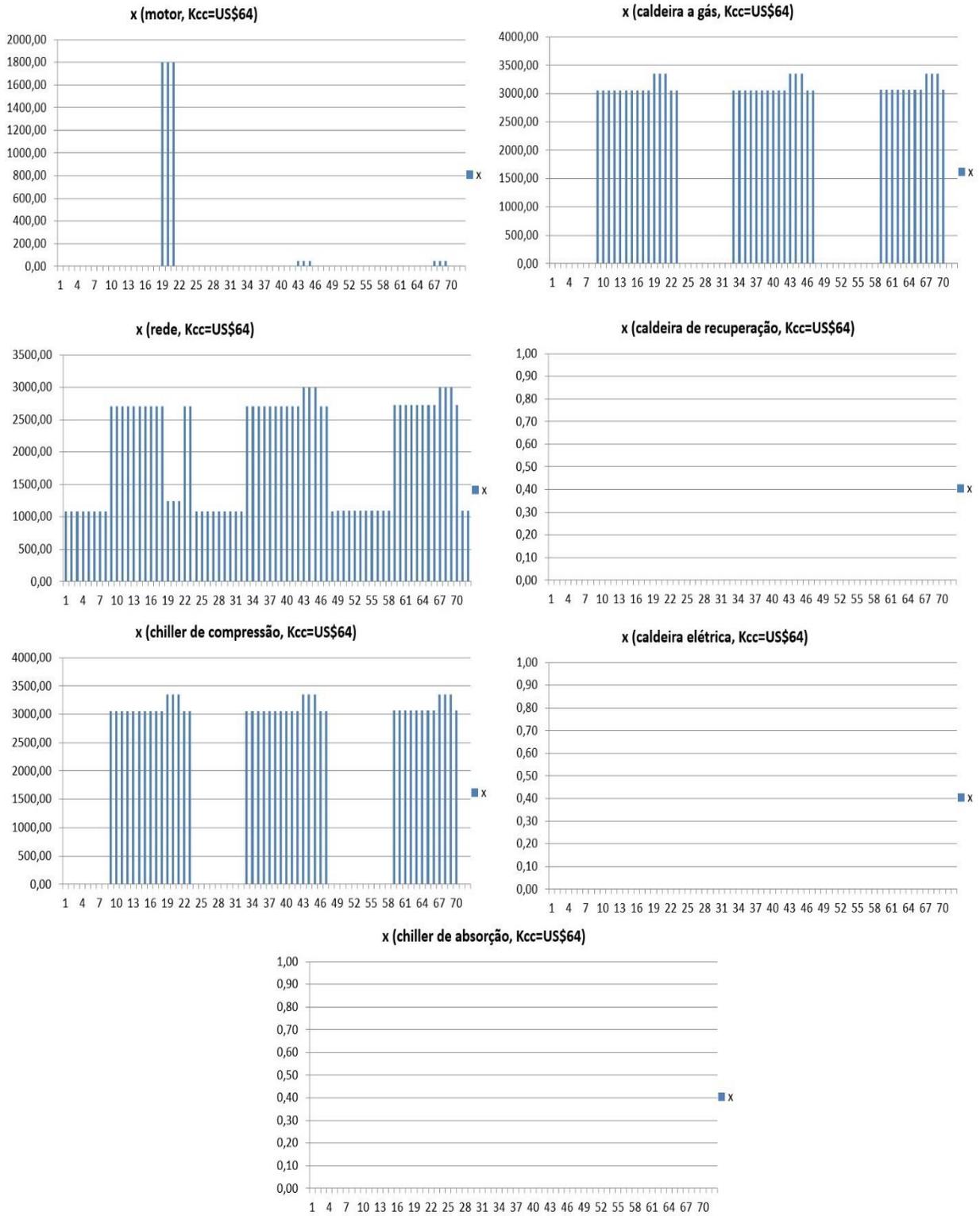
Hora	Energia elétrica (kW)			Vapor (kW)			Água gelada (kW)		
	Dia útil	Sáb.	Dom.	Dia útil	Sáb.	Dom.	Dia útil	Sáb.	Dom.
00:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
01:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
02:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
03:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
04:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
05:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
06:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
07:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0
08:00	1529	1529	1090	3050	3050	0	3050	3050	0
09:00	1529	1529	1090	3050	3050	0	3050	3050	0
10:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
11:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
12:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
13:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
14:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
15:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
16:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
17:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
18:00	1759	1759	1759	3346	3346	3346	3346	3346	3346
19:00	1759	1759	1759	3346	3346	3346	3346	3346	3346
20:00	1759	1759	1759	3346	3346	3346	3346	3346	3346
21:00	1529	1529	1543	3050	3050	3068	3050	3050	3068
22:00	1529	1529	1090	3050	3050	0	3050	3050	0
23:00	1079	1079	1090	0	0	0	0	0	0

Figura A1: Operação do sistema quando o valor do crédito de carbono é igual a US\$0 ($K_{cc}=\gamma$).



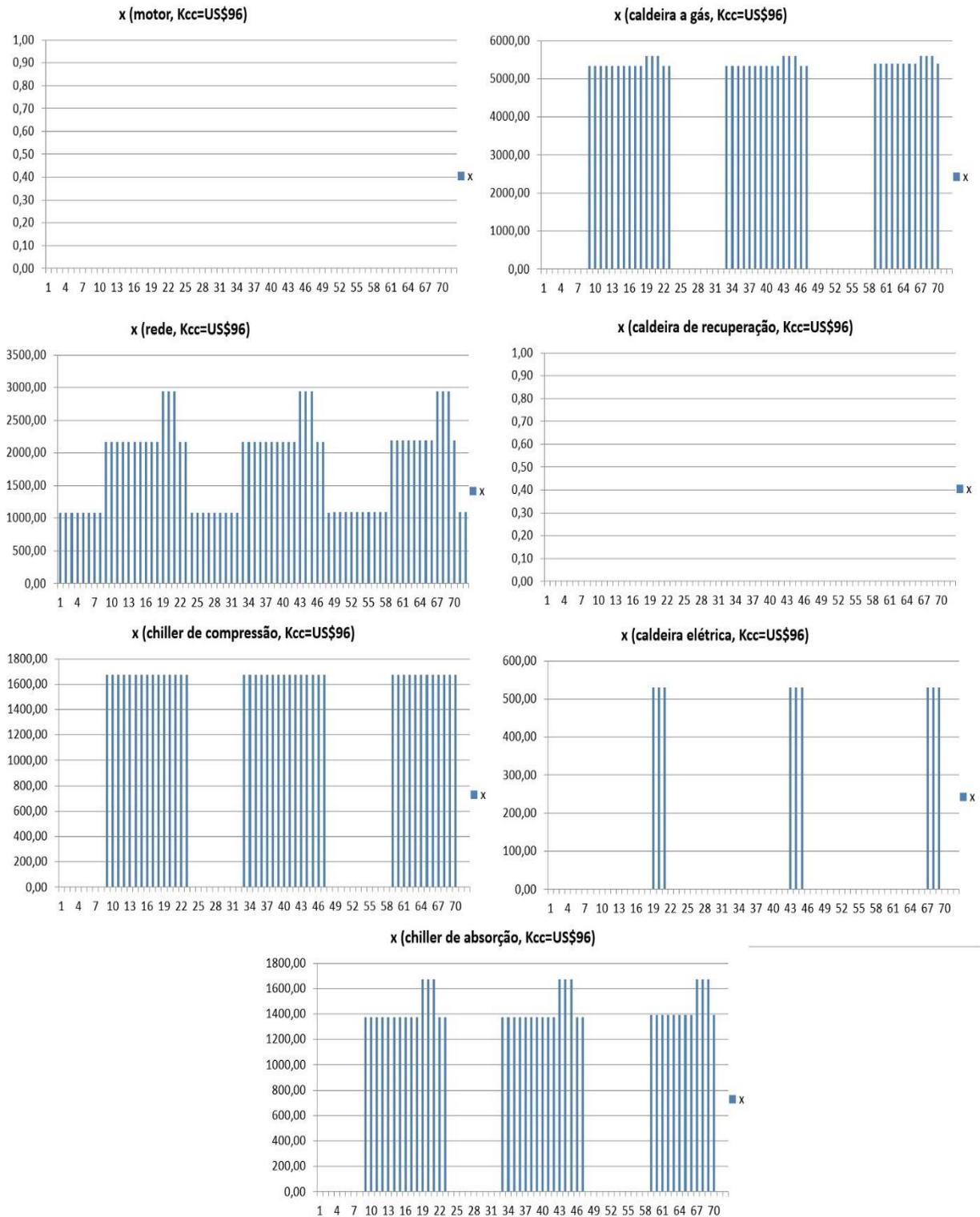
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A2: Operação do sistema quando o valor do crédito de carbono é igual a US\$64 ($K_{cc}=\gamma$).



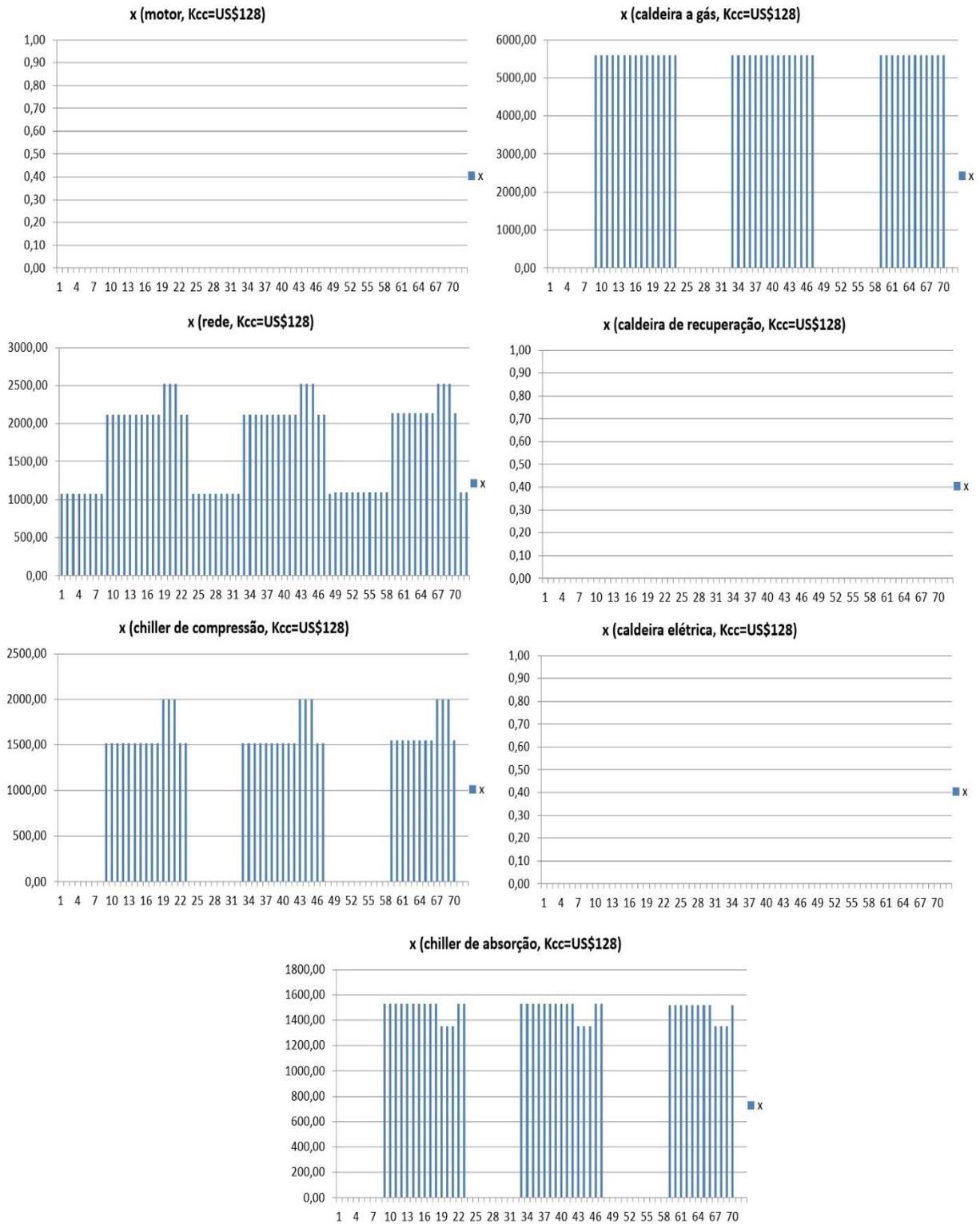
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A3: Operação do sistema quando o valor do crédito de carbono é igual a US\$98($K_{cc}=\gamma$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A4: Operação do sistema quando o valor do crédito de carbono é igual a US\$128($K_{cc}=\gamma$).



Fonte: Elaborado pelo autor.