



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÉSSICA MARIA MARQUES ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS ALINHADO AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO PARA O MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO**

Recife

2019

JÉSSICA MARIA MARQUES ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS ALINHADO AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO PARA O MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani

Co-orientador(a): Ma. Marcela França Prado de Souza

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- R672o Rocha, Jéssica Maria Marques.
Otimização de sistemas térmicos alinhado ao mecanismo de desenvolvimento limpo para o mercado de crédito de carbono / Jéssica Maria Marques Rocha – Recife, 2019.
50 f., figs., tabs., símbolos.
- Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani
Coorientadora: Ma. Marcela França Prado de Souza
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências.
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. Souza, Marcela França Prado de (Coorientadora). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019–323

JÉSSICA MARIA MARQUES ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS ALINHADO AO MECANISMO DE
DESENVOLVIMENTO LIMPO PARA O MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 09/07/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Santana Magnani (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. Guilherme Medeiros Soares de Andrade (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Eng. Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Finalizo mais uma etapa acadêmica, de bastante importância para mim – o Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Uma longa caminhada, pautada por inúmeros desafios, incertezas e alguns obstáculos. Este percurso só foi possível graças ao indispensável apoio, incentivo e esforço de algumas pessoas, a quem dedico este trabalho. Ao meu orientador, Professor Fábio Magnani, agradeço toda a compreensão, disponibilidade e capacidade crítica e objetiva ao longo desta caminhada. A minha co-orientadora Marcela Prado, por todo o conhecimento técnico e pessoal transmitido que me permitiram refletir e evoluir durante a pesquisa, além de sua compreensão e apoio que foram cruciais para a finalização desse trabalho. Aos meus amigos o meu muito obrigada pela ajuda e paciência. Ao meu namorado Luan Sales, pela partilha, companheirismo e compreensão que sempre me presenteou, permitindo-me concluir esta etapa. Por fim, um profundo agradecimento aqueles que são sem dúvida a âncora e o pilar que sustentou todo este percurso – os meus Pais – todo o esforço e dedicação que fizeram ao longo da vida, permitiram finalizar esta etapa com enorme alegria, mérito e orgulho. Sem vocês, nada disto seria possível. A vocês, dedico esta monografia.

RESUMO

Sistemas de trigeriação são sistemas térmicos capazes de produzir simultaneamente eletricidade, vapor e água gelada que desempenham importante papel no esforço internacional para reduzir as emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa, pois o calor residual de máquinas térmicas e as perdas de transmissão e distribuição são minimizadas. A otimização de sistemas de trigeriação consiste em uma análise matemática que potencializa as possibilidades de melhorias do sistema e contempla as várias possibilidades de melhorias disponíveis. As melhorias disponíveis podem ser dimensionadas de acordo com a métrica financeira, ou seja, aquela que gera melhores resultados monetários com vista na potencialidade dos créditos de carbono ou na métrica ambiental, que são aquelas que se concentram na diminuição dos gases de efeito estufa (GEE). Afim de contribuir na área de otimização de sistemas térmicos com ênfase na métrica ambiental é que foi proposto esse projeto de pesquisa utilizando o parâmetro crédito de carbono. A inclusão dessa tarifa no processo de otimização só foi possível porque o sistema térmico simulado apresentava potencial de redução de emissão, se enquadrando assim nas exigências do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). 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. Como resultado do respectivo trabalho foi possível concluir que para estimular os agentes econômicos a cumprirem as metas do Acordo de Paris e, conseqüentemente, viabilizar o mercado de crédito de carbono faz-se necessário um valor efetivo da tarifa variando em torno de US\$96 a US\$112, pois nesse intervalo o sistema otimizado demonstrou um aumento 45% na receita e uma redução na emissão de dióxido de carbono equivalente em 18,75%.

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

ABSTRACT

Trigeneration systems are thermal systems that could supply demand of cold water, steam, and electric energy. This kind of systems makes an important role on international effort to decrease the emissions of greenhouse gases, because the residual heat of thermal machines and the losses of transmissions and distribution are minimized. The optimization of trigeneration systems consists in a math analysis that increase the possibilities of improvements of the system and contemplates several possibilities of improvements available. The improvements available can be designed according to the economic metric, what generate the better monetary results, or according to environmental metric, focused on decrease the emissions of greenhouse gases. The purpose of contribute on the optimization process field, this study suggest evaluated the impact of the price of carbon credit on the chosen of trigeneration system, this parameter has by definition both financial and environmental nature. The inclusion of this tariff on the process of optimization were only possible because the thermal system simulated presented potential of decrease of emissions, working so on the exigencies of clean developments mechanisms. The linear programming were the method choosed to optimize the thermal system and the function choosed was the net present value (NPV) both financial and environmental. On the study of variation of tariff was possible to conclude that to stimulate the economic agents to meet the targets of Paris Climate Agreements is necessary a price ranging between US\$ 96 and US\$ 112, because in this interval the optimized system showed a 45% increase in revenue and a reduction in the issuance of 18.75%.

Keywords: Optimization system. Linear programming. Financial metric. Environmental metric. Clean developments mechanisms. Carbon credit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação preço do crédito de carbono em euro durante um ano	23
Figura 2 - Sistema genérico	30
Figura 3 - Variação do VPL financeiro e ambiental em função do preço do crédito de carbono	40
Figura 4 - Variação do VPL financeiro e da emissão de CO ₂ em função do preço do crédito de carbono.....	40
Figura 5 - Configuração do sistema base e sua operação para o tempo 19	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características comparativas entre o MDL e EU ETS	21
Tabela 2 - Dados para o gás natural	35
Tabela 3 - Dados das tarifas eléctricas de consumo e demanda no horário de ponta e fora de ponta	35
Tabela 4 - Emissão de CO ₂ para a produção de energia eléctrica em função da matriz energética	35
Tabela 5 - Custo de investimento financeiro e ambiental dos equipamentos	36
Tabela 6 - Rendimento dos equipamentos	36
Tabela 7 - Preço de venda interna e externa de energia, água gelada e vapor	37
Tabela 8 - Potência nominal dos equipamentos utilizadas	38
Tabela 9 - Dados referentes a operação do sistema e os respectivos VPLs em função da tarifa de crédito de carbono, γ	41

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 CO ₂ 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;
n	Número de meses;
N_{equip}	Potência nominal do equipamento;
tCO_2e	Tonelada de CO ₂ equivalente;
VPL	Valor presente líquido;
VI	Valor inicial;
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 CO ₂ da linha de base;
n	Número de meses;
N_{equip}	Potência nominal do equipamento;
tCO_2e	Tonelada de CO ₂ 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;
$VPLCC$	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	11
2	JUSTIFICATIVA	13
3	OBJETIVO GERAL	14
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
4.1	ESTUDO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	15
4.2	MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO	17
4.3	MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO REGULADO E VOLUNTÁRIO	19
4.4	MERCADO DE CARBONO NO ÂMBITO INTERNACIONAL	20
4.5	MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO NO BRASIL	24
4.6	OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS	25
5	METODOLOGIA	27
5.1	MÉTRICA	27
5.2	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA	28
5.2.1	Proposição do sistema térmico	29
5.3	MODELAGEM	31
5.4	DADOS	34
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
6.1	ESTUDO DE CASO: IMPACTO DA VARIAÇÃO DO GAMA NA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS	39
7	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais resultantes das emissões de gases com efeito estufa estão comprometendo o futuro do planeta e 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 das alterações climáticas.

Diante dessa preocupação foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (CQNM), conhecida pela sigla em inglês, UNFCCC. A Conferência das Partes (COP) é o órgão supremo da UNFCCC, que funciona como um foro internacional onde reúne anualmente os países Parte para discutir as melhores formas de lidar com as alterações climáticas. No ano de 1997, a 3ª Conferência das Partes (COP3) firmou o famoso compromisso intitulado “Protocolo de Quioto”, visando a reduzir as emissões de GEE e limitar os efeitos do aquecimento global. Os países mais industrializados, ficaram responsáveis pelo corte nas emissões por meio do estabelecimento de metas absolutas e com a obrigação de financiar países em desenvolvimento, como o Brasil. Além das metas obrigatórias, o documento estabeleceu três principais mecanismos para mitigação: o Comércio de Emissões (CE), a Implementação Conjunta (IC) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Nessa monografia, a perspectiva de estudo é direcionada para o MDL, no qual seu propósito é a mitigação de GEE ou captura de carbono em países em desenvolvimento, onde muitas vezes o custo de redução é consideravelmente mais baixo. Uma vez comprovada a redução são emitidos certificados conhecidos como Redução Certificada de Emissões (RCE) ou créditos de carbono que podem ser comercializados com os países que têm metas a cumprir, dando origem ao mercado de crédito de carbono. Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivalente reduzido corresponde a um crédito de carbono.

No entanto, o Brasil tende a encarar um desafio semelhante ao que os países desenvolvidos enfrentam hoje: desenvolvimento econômico com baixa emissão de GEE relacionados à energia. Uma das formas de administrar essa realidade é investir no planejamento energético nos diversos setores da economia. Em se tratando do setor industrial a elaboração de um planejamento energético está atrelado, principalmente, no melhoramento contínuo dos seus processos produtivos e no investimento na otimização dos sistemas. Juntamente com a

otimização, existe a possibilidade de retorno financeiro e ambiental através da adequação do sistema ao mercado de crédito de carbono. De maneira geral, uma empresa brasileira para se tornar elegível a adentrar no mercado de crédito de carbono, tem de atender a uma série de critérios que vão influir na sua elegibilidade. Primeiramente os projetos devem utilizar metodologias aprovadas e ser validados e verificados por Entidades Operacionais Designadas (EODs), que no caso do Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, composta por representantes de 11 ministérios, além de ser habilitados e registrados pelo Conselho Executivo do MDL. Também o governo do país anfitrião, através da Autoridade Nacional Designada (AND), assim como o governo do país que comprará as RCEs, devem avaliar os projetos.

Com base no exposto acima, foi proposto nessa monografia a simulação e otimização de um sistema térmico de trigerção capaz de suprir uma demanda de energia elétrica, água gelada e vapor que se adeque aos critérios para um projeto do MDL. A trigerção desempenha importante papel no esforço internacional para reduzir as emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa, pois o calor residual de máquinas térmicas e as perdas de transmissão e distribuição – uma consequência inevitável da geração remota de eletricidade – são minimizadas. A simulação consta apenas com a variação do crédito de carbono com objetivo em analisar o retorno financeiro, os impactos ambientais e a viabilidade decorrentes dessa parametrização dentro de um intervalo mais próximo possível da perspectiva de valor monetário da tarifa de crédito de carbono estipulado pelos especialistas. É importante frisar que o respectivo trabalho é uma extensão da dissertação de mestrado de Souza (2017).

Investir tempo e recursos na otimização de sistemas térmicos com foco tanto na métrica financeira quanto ambiental, pode trazer redução de custos financeiros e redução na emissão de CO₂ a médio e longo prazo e contribuem para que o Brasil possa ser, mais uma vez, pioneiro na proposição e implementação de soluções que contribuam para o meio ambiente e para a sociedade como um todo.

2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) até 2030, as consequências das mudanças climáticas provocarão gastos com saúde de até 4 bilhões de dólares por ano. “De vilarejos rurais até grandes cidades, todos já estão sofrendo com inundações, secas, ondas de calor mais frequentes, enchentes, entre outros (fenômenos). Tais episódios podem provocar um aumento na incidência de doenças e afetar a saúde das populações. Isso mostra que as mudanças do clima não são um assunto futuro, mas atual”, alertou a oficial sênior da ONU Meio Ambiente, Regina Cavini.

Considerado um dos países com metas mais ambiciosas, o compromisso brasileiro no Acordo de Paris é cortar 37% das emissões até 2025, com indicativo de reduzir 43% até 2030. Outras metas brasileiras são aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética para aproximadamente 18%, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como aumentar em 45% a participação de energias renováveis na composição da matriz energética até 2030.

O propósito dessa pesquisa consiste no fato de que o Brasil sempre possuiu papel fundamental nos debates sobre mudanças climáticas, seja pela diversidade de seus recursos naturais ou seja pelas consequências que as mudanças climáticas vem causando no país. O governo brasileiro sempre esteve engajado nas discussões do tema, exercendo um papel de liderança perante os países em desenvolvimento, principalmente na América do Sul. Nesse contexto, o estímulo de projetos com otimização de sistemas térmicos utilizando métricas financeiras quanto ambientais voltado para o mercado de crédito de carbono é uma alternativa viável no desafio de reduzir as emissões de gases poluentes, pois além dos ganhos ambientais, as vendas de créditos de carbono trazem retornos financeiros atrativos.

Assim, elaborar um planejamento energético de seus sistemas térmicos, bem como, compreender os desafios do mercado de crédito de carbono, constituem tarefas fundamentais para uma empresa que busque formas de tornar sua produção mais sustentável.

3 OBJETIVO GERAL

A presente monografia tem por objetivo geral a otimização de um sistema térmico alinhado as exigências do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e que considera no processo de otimização métricas financeiras e ambientais, avaliando o efeito da variação paramétrica de variáveis relevantes, tais como, tarifa de crédito de carbono (γ) e fator financeiro-ambiental (α) sobre a otimização do sistema.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com base no alinhamento acima, foi definido os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar como funciona o Mercado de Crédito de Carbono no mundo e no Brasil;
- b) Como e em que condições uma empresa brasileira pode fazer parte do mercado do crédito de carbono;
- c) Através da análise dos resultados verificar o impacto financeiro e ambiental decorrentes da variação paramétrica sobre o processo de otimização e sobre a escolha do sistema ótimo.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada uma fundamentação teórica sobre as mudanças climáticas, os requisitos necessários para submeter um projeto ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o panorama atual do mercado de crédito de carbono no Brasil e no mundo. Além de definições importantes da função objetivo de otimização financeira e ambiental para um melhor entendimento do processo de otimização.

4.1 ESTUDO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

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. O dióxido de carbono (CO₂) é o gás com efeito de estufa mais emitido, sendo normalmente liberado por atividades humanas. No entanto outros gases na atmosfera terrestre como o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) têm a capacidade de absorver calor de forma mais eficaz que o CO₂, se esses gases não tivessem essa propriedade a terra teria uma temperatura 33°C menor do que a atual e o planeta seria congelado (ABRIL, 2016). Deste modo, para que fossem quantificadas as emissões em uma única unidade, criou-se o termo "carbono equivalente". Que nada mais é que um instrumento de conversão dos demais gases em CO₂ de acordo com o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*, na sigla em inglês). O GWP dos gases de efeito estufa é relacionado à capacidade de cada um deles de absorver calor na atmosfera (eficiência radiativa) em um determinado tempo (geralmente 100 anos), comparada à mesma capacidade de absorção de calor por parte do CO₂. Assim, a fórmula para o cálculo do carbono equivalente é a multiplicação da quantidade de um gás por seu GWP. Essa definição de carbono equivalente é útil na conversão em créditos de carbono que será explicado no decorrer do trabalho.

Em razão das atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, o emprego de certos fertilizantes, o desmatamento e o grande desperdício contemporâneo de alimentos, que têm entre seus resultados a elevação nos níveis atmosféricos de gases estufa, vêm intensificando de maneira importante o efeito estufa e desestabilizando o equilíbrio energético no planeta, produzindo um fenômeno conhecido como aquecimento global.

Diante da preocupação mundial com os impactos negativos proveniente do aquecimento global, foi firmado durante a 3ª Conferência das Partes (COP3) o compromisso conhecido como o Protocolo de Quioto, um tratado internacional em que os países signatários se comprometeram a reduzir as suas respectivas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. O protocolo foi negociado em 11 de dezembro de 1997 e entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, quando atingiu a meta de 50% de ratificações dentre os 84 signatários originais. Ele propôs um calendário pelo qual os participantes devem reduzir as emissões globais em, pelo menos, 5,2% abaixo dos níveis registrados em 1990, no período entre 2008 e 2012. Embora a meta de redução seja coletiva, foram atribuídas a cada país metas individuais mais altas ou mais baixas, seguindo a lógica de que países desenvolvidos são historicamente responsáveis pelas concentrações atuais de gases de efeito estufa na atmosfera.

Aliás, este é um dos pontos que tornam o acordo controverso. As metas nacionais variavam de 8% de redução para a União Europeia, 7% para os EUA, de 6% para o Japão, 0% para a Rússia, e permitiram aumentos de 8% para a Austrália e 10% para a Islândia. Países em desenvolvimento, incluindo China e Índia, não foram obrigados a reduzir as emissões. Os Estados Unidos e Canadá negaram-se a ratificar o Protocolo de Quioto, sob a alegação de que os compromissos acordados seriam negativos para as suas economias. (OECD, 2015). Dentre os 196 países-membros da UNFCCC, 192 ratificaram o Protocolo de Quioto. Enquanto que quase todos os países do mundo (os 196 membros da UNFCCC) tenham assinado o Protocolo, a assinatura é apenas um gesto simbólico de apoio. É a ratificação que carrega obrigações legais e torna o tratado num acordo contratual eficaz entre os participantes.

O objetivo final da UNFCCC através do Protocolo de Quioto é a "estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível que iria parar de interferência antropogênica perigosa com o sistema climático." No chamado primeiro período de compromisso (2008-2012), as limitações de emissões não foram suficientes. Pelo contrário, os níveis de dióxido de carbono na atmosfera aumentam, sem nenhum sinal de desaceleração. E as temperaturas globais continuam a aumentar.

Como não foi alcançada, a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera exige novas ações. O Protocolo de Quioto teria sido encerrado em 31 de dezembro de 2012 mas, durante a COP-18 teve sua duração estendida. Realizada em Doha, Qatar, em 8 de

dezembro de 2012, foi adotada uma emenda ao Protocolo em que os membros concordaram que segundo período de compromisso se estenderá de 2013 a 2020.

4.2 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

O protocolo de Quioto estabeleceu que países industrializados deveriam diminuir suas emissões de GEE em relação as metas de 1990. Para tanto o protocolo propôs três ferramentas que poderiam ser utilizadas para cumprir as metas impostas a cada país. Os países desenvolvidos teriam que se propor a diminuir as emissões de GEE já existentes, para que passassem a influenciar menos no aquecimento global, ou então, estabelecer parcerias conjuntas com países que poluem menos, para que o mesmo pudesse compensar suas emissões. Nesse contexto os países desenvolvidos puderam contar com o comércio de emissões e as implementações conjuntas, que nada mais são que acordos onde países que emitem quantidades exorbitantes de poluentes se aliam com países que emitem menos quantidades para poder se aproveitar do excedente de cota de poluição que esses países teriam direito.

O grande desafio então estava nos países em desenvolvimento, que por sua estratégia de crescimento teriam como consequência indesejada o aumento da emissão de gases poluentes. A partir desse emblema foi criado o mecanismo de desenvolvimento limpo, o MDL. Este mecanismo baseia-se no financiamento dos países industrializados em projetos que reduzem emissões de GEE implementados em países em desenvolvimento, gerando assim, um “crédito” referente a essa redução para esses países industrializados, ao mesmo tempo contribuindo para que os países hospedeiros se beneficiem com os recursos financeiros e tecnológicos. Por esta razão, o MDL tem sido considerado um mecanismo bastante atrativo para o Brasil, já que o país tem potencial de redução e oportunidades de ação em todos os setores da economia (ARAÚJO, 2008).

Entre as estratégias englobadas pelo MDL estão: desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, parcerias tecnológicas de desenvolvimento limpo com países desenvolvidos, desenvolvimento de políticas ambientais e o sistema de comércio de crédito de carbono. O sistema de comércio de crédito de carbono visa transformar emissões de carbono em *commodities* (mercadorias negociadas com preços estabelecidos pelo mercado internacional), através do qual um país ou instituição que reduzir suas emissões em determinada quantidade

específica, ganha certificados conhecido como Redução Certificada de Emissões (RCE) ou Créditos de carbono e tem liberdade para negociar esse papel, trazendo para si um ganho financeiro ou estratégico para a empresa que aderir o sistema. É importante salientar que, para que se tenha a valorização de mercado das reduções de emissões, além da mensuração da efetiva redução, decorrente da atividade do projeto de MDL, faz-se necessária a conversão em unidades de toneladas de dióxido de carbono equivalentes por ano (tCO₂e).

Todo projeto para ser aceito pelo MDL é submetido a um ciclo administrativo específico que consiste em sete etapas da UNFCCC. Primeiramente, o proponente do projeto (uma empresa de assessoria) deve elaborar o Documento de Concepção do Projeto (DCP), que contém as seguintes informações: descrição geral do projeto; metodologia de linha de base a ser utilizada; prazo do projeto; metodologia e plano de monitoramento; estimativa de emissões de gases de efeito estufa; impactos ambientais do projeto; comentários dos participantes envolvidos; informações sobre fontes de financiamento público de partes do Anexo I para o projeto. Posteriormente, uma Entidade Operacional Designada (EOD), organização credenciada pela UNFCCC, deve validar a metodologia utilizada no DCP. Numa terceira etapa, a Autoridade Nacional Designada (AND), que, no Brasil, é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, deve confirmar que o país ratificou o Protocolo de Quioto, que a participação não é obrigatória e que o país anfitrião atesta a contribuição do projeto para o desenvolvimento sustentável. Então, o projeto deve ser, em seguida, registrado no Conselho Executivo do MDL. Na quinta etapa, o proponente do projeto deve desempenhar a atividade de monitoramento e enviar relatórios de monitoramento documentando a atividade do projeto e a redução efetiva das emissões. Em seguida, a EOD realiza a verificação e a certificação da redução desses relatórios de monitoramento. E por fim, as RCEs são emitidas, de tempos em tempos, pelo Conselho Executivo do MDL.

O MDL, além de permitir a constituição de um mercado, tem gerado um duplo dividendo para as empresas, já que contribui para o fomento de tecnologias ambientalmente seguras, gerando ganhos para a sociedade, e permite que as empresas obtenham ganhos financeiros por meio da comercialização dos RCEs (SOUZA, 2011).

4.3 MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO REGULADO E VOLUNTÁRIO

O Protocolo de Kyoto representa o Mercado Regulado, também chamado *Compliance*, onde os países possuem metas de reduções a serem cumpridas de forma obrigatória. Existe, por sua vez, um Mercado Voluntário que surgiu de forma paralela ao protocolo, com as Reduções Voluntárias de Emissões – VERs em inglês. Nele, qualquer empresa, ONGs, instituições, governos, ou mesmo cidadãos, tomam a iniciativa de reduzir as emissões voluntariamente. Esses créditos, também são auditados por uma entidade independente, mas não estão sujeitos a registros da ONU e por isso não valem como meta de redução para os países que fazem parte do acordo internacional. O Brasil não assumiu meta obrigatória em Quioto por ser um país em desenvolvimento e, portanto, os projetos baseados no Brasil só participaram como fornecedores de créditos de carbono do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, chamados Reduções Certificadas de Emissões – RCEs.

De acordo com a *Sustainable Carbon*, uma das principais diferenças entre os dois mercados é a precificação do crédito de carbono. Atualmente, os preços do mercado de carbono voluntário são mais altos comparados ao regulado. As RCEs seguem uma lógica semelhante ao das *commodities*, com pouca diferenciação entre projetos e alta oferta. Seus compradores estão preocupados especialmente em atender uma meta obrigatória de compensação de emissões, motivo pelo qual se dá pouca importância para a origem do crédito e tipo de projeto. Já os VERs buscam atender uma demanda especial, geralmente de empresas que buscam reforçar suas estratégias de sustentabilidade e governança climática, valorizar suas marcas, diferenciar seus produtos, engajar stakeholders, dentre outros. Nesse caso a origem, os padrões utilizados e os benefícios socioambientais são de extrema importância para o comprador, bem como a qualidade do projeto.

O mercado de crédito de carbono melhorou o custo/eficiência para o preço do carbono e acelerou os investimentos em tecnologias limpas e tecnologias com baixa emissão de carbono. (VON AVENARIUS; SETTYGOWDA; KIESEL, 2017)

4.4 MERCADO DE CARBONO NO ÂMBITO INTERNACIONAL

O primeiro mercado de comércio de emissões, *Emission Trading Scheme do Reino Unido* (UK ETS) foi desenvolvido em 2002, por meio de um leilão de 4.028.176 tCO₂e. Em 2007, este programa encerrou suas atividades, mas ocasionou a criação do Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), que começou a operar em janeiro de 2005.

O *European Union Emissions Trading System* (EU-ETS) é o primeiro e maior sistema internacional de compra e venda de carbono do mundo, no qual surgiu com o objetivo de ajudar os países do Anexo I a cumprirem suas metas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto. Ele opera em 31 países (todos os 28 países da UE, mais a Islândia, Liechtenstein e Noruega). Segundo dados da Comissão Europeia, o mercado de ETS cobre 40% de todas as emissões de GEE da U.E. e impõe limites sobre mais de 11 mil instalações de uso intensivo de energia, tais como, centrais de produção de energia e indústrias. A União Europeia explica que o EU-ETS funciona em um sistema de “*cap and trade*”. Um “*cap*” ou limite é estabelecido na quantidade de emissões que as companhias e indústrias podem emitir por setor econômico. De tempos em tempos esse *cap* deve ser revisado e reduzido para que as metas sejam cada vez mais ambiciosas. Depois de o teto ser definido, as indústrias recebem uma alocação de licenças para emitir e podem comprar e vender entre outras da mesma área de atuação para suprir suas necessidades. A premissa deste sistema *cap and trade* seria eficaz porque, se uma indústria exceder a quantidade de carbono previamente estabelecida, ela deverá arcar com multas muito altas que acabam incentivando o cumprimento das regras.

O EU-ETS também está inspirando o desenvolvimento do comércio de emissões em outros países e regiões e servindo de modelo para inúmeros países que visam mitigar suas emissões de carbono e estimular o investimento em tecnologias de baixo carbono. De acordo com seu site, em 2020 as emissões dos setores abrangidos pelo sistema serão 21% menores do que em 2005.

Diante da crise econômica em 2008 a demanda mundial por energia e o preço do petróleo caíram e, conseqüentemente, o mesmo ocorreu com as emissões de carbono. Logo, o mercado EU-ETS sofreu impacto significativo sob os efeitos dessa crise. Um relatório Britânico do *Climate Change Committee* (CAMBRIDGE ECONOMETRICS, 2009, apud LAING et al., 2013, p. 9) provou que essas reduções de carbono documentadas entre 2008 e 2012 foram resultado da crise financeira.

Consequentemente o incentivo à inovação tecnológica de baixo carbono também se encontra prejudicado diante de uma crise financeira, pois a troca de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis é um processo de longo prazo. O interesse em diminuir níveis de emissões tende a deixar de ser priorizado, podendo deixar o desenvolvimento de tecnologias limpas estagnado. A economia afeta também a decisão de investidores em fontes alternativas devido à imprevisibilidade do mercado, sendo mais efetivo buscar incentivos em curto prazo (LAING et al., 2013, p.11).

Um outro aspecto que abrange a dinâmica de “*cap and trade*” utilizado pelo EU-ETS é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). A Comissão do EU-ETS criou a Linking Directive, que funciona como um regime regulatório estabelecendo a relação entre o Protocolo de Quioto e EU-ETS. A Diretiva permitiu que os países do EU-ETS usem créditos de carbono resultantes do MDL para cumprir os seus compromissos (GODOY et al. 2015). De acordo com Laing et al. (2013, p.12) o fato da União Europeia participar do MDL e incluir créditos internacionais de carbono em seu cap acaba prejudicando a contagem, o rigor e a clareza da política europeia. O que entra em questão é se um país europeu desejar comprar créditos de carbono, ele deverá seguir a lei europeia ou a lei do país de onde deseja comprar as RCEs (PUPPIM DE OLIVEIRA, 2005). Apesar do comércio de emissões e o MDL apresentarem diferenças entre si, eles possuem muitos pontos em semelhança como pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 1 - Características comparativas entre o MDL e EU ETS

EU ETS	MDL
Países europeus desenvolvidos.	Países em desenvolvimento.
Separado por setores: Cimento e Cal, papel, ferro, cerâmica, produtos químicos, hospitais, universidades, aviação.	Separado por setores: Energia, transporte, emissões fugitivas de combustíveis, combustíveis sólidos, petróleo e gás natural, processos industriais, produtos minerais, indústria química, produção de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre, consumo de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre, agricultura, uso do solo, mudança do uso do solo e floresta, e tratamento de esgoto.
Separado por setores.	Separado por setores.
Limites de emissão repassados aos Governos, e alteram os projetos de acordo com as políticas dos países.	Metas de redução de emissão são repassados aos Governos e a implantação dos projetos devem estar de acordo com as políticas dos países.
Metas até 2020.	Metas até 2020.
Limites anuais.	Metas no período e repassadas aos Governos.

EU ETS	MDL
Três fases (2005 a 2007; 2008 a 2012; 2013 a 2020).	Duas fases (2008 a 2012; 2013 a 2020).
Participação no EU ETS atualmente é mandatória para certos setores.	Continua voluntário.
Limites de Emissão (permissões para emitir, licenças de emissão, <i>allowances</i>).	Metas de redução (certificados de emissão reduzidas, certificados de redução).
GEE convertidos em CO ₂ e	GEE convertidos em CO ₂ e
Monitoramento anual	Monitoramento anual
Baseia-se no princípio “learning by doing” de atualizações e modificações necessárias ao longo do tempo.	Baseia-se no princípio “learning by doing” de atualizações e modificações necessárias ao longo do tempo.
Países europeus participantes do programa.	Países em desenvolvimento interessados.
Fases do processo de EU ETS: elaboração, aprovação, repasse das Permissões para emitir, monitoramento, creditação, verificação.	Fases do processo de MDL: elaboração, aprovação, validação, registro, monitoramento, certificação, emissão dos certificados
Tributação: política nacional.	Tributação: política nacional.
Comitê regulador: Comissão da EU ETS.	Comitê regulador: Executivo do MDL.
Metodologias de cálculos de reduções de emissões mais generalizadas.	Metodologias de cálculos de reduções de emissões mais detalhadas.
Documentos de cunho jurídico, que decorrem da DIRECTIVA 2003/87/CE, e as demais emendas baseiam-se nesse documento inicial.	Documentos de cunho jurídico, que decorrem do Protocolo de Kyoto, de 1998, e as demais emendas baseiam-se nesse documento inicial.

Fonte: (GODOY et al., 2015)

Já os EUA possuem algumas instituições que se propuseram a organizar a realização das compras e vendas de créditos de carbono, por exemplo, a *Chicago Climate Exchange – CCX* (Em português, Bolsa do Clima de Chicago), a *Regional Greenhouse Gas Initiative - RGGI* (Em português, Iniciativa Regional dos Gases de Efeito Estufa) e a *Western Climate Initiative – WCI* (Em Português, Iniciativa do Clima Ocidental). A CCX operou no modo “*cap and trade*” entre dezembro de 2003 e 2010, e em 2011, lançou o Programa de Registro de Compensações. Os membros assumiram voluntariamente o compromisso de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, que passavam a ser controladas através de um acordo jurídico. Os membros que reduzissem as emissões abaixo das metas e possuíssem permissões em excesso poderiam vendê-las ou poupá-las àqueles que não alcançassem as metas. A RGGI é formada pelos estados de Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New York, Rhode Island e Vermont; a instituição utiliza o sistema “*cap and trade*” e implementou, para 2014, a

meta de capturar 91 milhões de toneladas de CO₂. A WCI é composta pelo estado da Califórnia e pelas províncias canadenses Columbia Britânica e Quebec, a iniciativa não possui fins lucrativos e busca oferecer serviços técnicos e administrativos para a realização de comércio referentes às emissões de gases do efeito estufa.

Atualmente, o mercado de créditos de carbono segue em desalento, em função de crises financeiras. Contudo, é preciso ressaltar que, conforme Hepburn (2010), o mercado de comercialização de títulos estimuladores da redução de emissões de gases já existia antes do lançamento do Protocolo de Quioto e, curiosamente, nos Estados Unidos, na década de 1970, com aperfeiçoamentos em 1990 com a alteração da legislação sobre qualidade do ar (*Clean Air Act*). Assim sendo, o mercado de carbono tem possibilidades de reagir e se manter ativo, em vista dos compromissos de redução de emissões assumidos por vários países, inclusive com a entrada em vigor do Acordo de Paris a partir de 2020. O reflexo dessa reação pode ser observado na Figura 1 com um aumento significativo do preço do crédito de carbono de 2018 até os dias atuais.

Figura 1 - Variação preço do crédito de carbono em euro durante um ano.



Fonte: (MARKETS INSIDER, 2019)

4.5 MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO NO BRASIL

A experiência brasileira com o mercado de carbono possui maior relevância em escala internacional do que nacional, pois o país não possui um mercado propriamente dito. Ao contrário do EU ETS que incentiva o mercado dentro do bloco, o Brasil utiliza o MDL como instrumento de mercado para realizar transações entre países, pois seu incentivo externo é maior do que o interno. No ambiente interno a compra e a venda de créditos é por meio de leilões, promovidos pela BM&FBOVESPA, que é uma companhia que administra mercados organizados de títulos, valores mobiliários e contratos derivativos, além de prestar serviços de registro, compensação e liquidação. As transações são feitas em um ambiente eletrônico, via internet. De acordo com a BMFBOVESPA os leilões são modelados conforme as características específicas da oferta. As regras adotadas em cada leilão são divulgadas por meio de anúncios públicos ou editais. Podem participar dessas operações: corretoras associadas à BM&FBOVESPA, representando seus clientes; Comerciantes do mercado de RCE e do mercado de permissões europeu; Participantes do mercado de carbono global credenciados pelo BM&FBOVESPA; Fundos de carbono; Organismos multilaterais de financiamento; Entidades governamentais.

Durante o Encontro Internacional sobre Precificação de Carbono, realizado em São Paulo, em 19 de junho de 2018, foi revelado que 42 governos nacionais e 25 subnacionais já precificam carbono. No Brasil, as iniciativas de precificação são lideradas pelas empresas, que aplicam o sistema internamente (CEDBS, 2018).

Nesse encontro, foi apresentado o estudo “Precificação do Carbono na Indústria Brasileira: Uma Iniciativa Estratégica”, que recomenda a implementação do mercado de carbono no Brasil de forma gradual. Para isso, sugere o estudo, é preciso proteger a competitividade das empresas, sendo necessária uma fase inicial de compromisso de 5 anos, com a concessão de licenças gratuitas, isenção de impostos e preço teto de US\$ 10 por tonelada de gás carbônico, por exemplo.

4.6 OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS

A programação linear é utilizado para otimizar (maximizar ou minimizar) uma função objetivo e restrições que assumem características lineares. Por ser um dos métodos mais clássicos para otimizar os sistemas térmicos, foi o método escolhido para o respectivo trabalho. O MATLAB foi o software utilizado nessa dissertação para otimizar o sistema genérico através da programação linear.

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 (kgCO₂e ou tCO₂e).

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. O grupo de pesquisa do Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST) e de estudos sobre bicicletas e motocicletas 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, a partir de 2014 alguns estudos foram realizados levando em consideração também a métrica ambiental. Assim, esse trabalho faz parte de um

processo de evolução do tema e veio para contribuir ainda mais com os estudos da otimização financeira e ambiental de sistemas térmicos.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado a metodologia do estudo de caso e suas modelagens que foram reaproveitadas do trabalho de Souza (2017). Como a modelagem utilizada neste trabalho vem de um processo de modificação e evolução, esse capítulo será iniciado com a apresentação da métrica utilizada no processo de otimização na sua forma mais geral e posteriormente os casos particulares pertinentes serão apresentados.

Em seguida, 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 do estudo de caso e os dados necessários.

5.1 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. 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.

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

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

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.

De acordo com Souza (2017) 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).

Hornsby et al., (2017) estabeleceu uma combinação linear entre os dois termos utilizando um fator definido como α . O fator α é a relação entre os pesos dos fatores ambientais e financeiros de modo que podem variar de (0 a 1), sendo assim numa situação em que utilizamos apenas a métrica ambiental nós estabelecemos o fator $\alpha = 0$ e em caso de necessidade de análise puramente financeira estabelecemos o $\alpha = 1$. Os valores intermediários também são possíveis estabelecendo os devidos pesos a serem aplicados na equação matemática, basta definir α com valores compreendidos entre 0 e 1.

Além disso, uma das grandes contribuições da dissertação de Souza (2017) foi a inclusão da tarifa do crédito de carbono no cálculo do VPL, designada por γ . Essa tarifa do crédito de carbono é dada em US\$/tCO₂e, 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 do que a linha base (ou seja, $D_{amb} > 0$), pois, não há ganho financeiro associado se o sistema otimizado emitir mais ou igual que a linha base (ou seja, $D_{amb} \leq 0$). A linha de base corresponde a emissão de CO₂ do sistema antes da otimização, equivalente a 239.973tCO₂e, dado extraído do trabalho de Souza (2017).

Com base nessa explicação é possível inferir o formato geral da métrica, valor presente líquido, utilizada nas pesquisas do LOST. Assim, tem-se a seguinte função objetivo:

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

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. O estudo de caso desse respectivo trabalho foi voltado para otimização financeira com créditos de carbono, levando em consideração $\alpha=1$ e $\gamma=[0,\infty]$.

$$VPL_{\alpha=1,\gamma=[0,\infty]} = VPL_{cc} = VPL_{fin} + D_{amb} \cdot \gamma \quad (4)$$

5.2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

A programação linear (LP) consiste em otimizar uma função linear sujeita a restrições lineares por meio de variáveis reais.

O processo de otimização ajudará a definir qual a configuração ótima do sistema de trigeriação, de acordo com a métrica escolhida para a análise do VPL. A programação linear possibilitou então otimizar o sistema, através das devidas definições das variáveis na função objetivo que permitiam então definir os pesos das métricas ambiental e financeira. As variáveis de decisão do problema são as potências operacionais do equipamento, as quais dependem das potências nominais disponíveis. Entretanto a maior parte dos valores disponíveis no mercado não são distribuídos uniformemente, dificultando assim a utilização de modelos matemáticos de otimização, como a programação linear.

A partir de então Magnani *et al.* (2013) propuseram um método híbrido de quatro etapas, afim de otimizar o sistema:

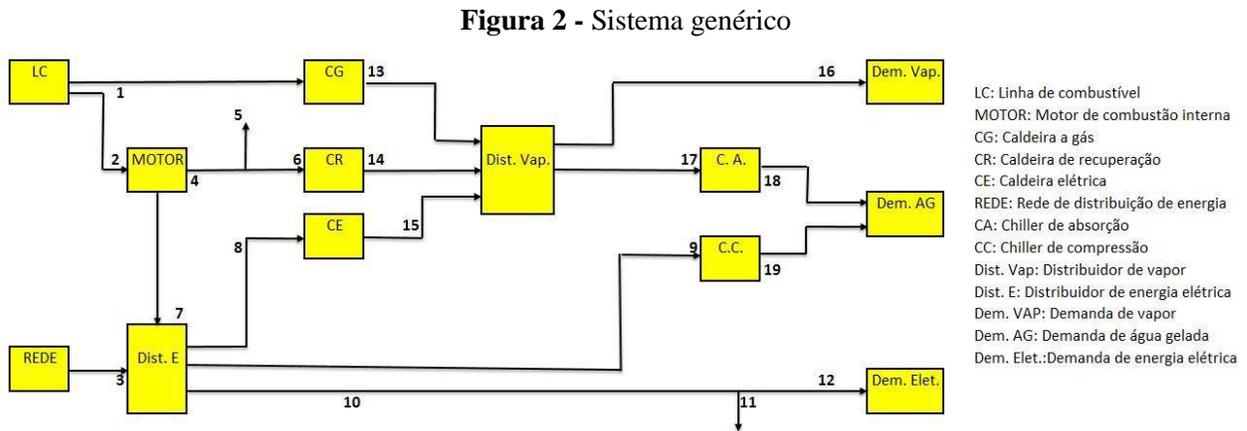
1. Proposição do sistema;
2. Escolha das potências nominais para cada equipamento;
3. Busca exaustiva de todas as configurações do sistema possíveis, através da permutação dos equipamentos;
4. Uso da programação linear para otimizar os fluxos de energia, com variáveis lineares, para cada permutação de 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 (SOUZA,2017).

5.2.1 Proposição do sistema térmico

O sistema de trigeriação em sua concepção é 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 linha de combustível, necessárias para transmissão de energia. O sistema

atuando em conjunto é capaz de atender as demandas de energia elétrica, vapor e água gelada. O esquema de um sistema genérico pode ser observado na figura 2.



Fonte: (SOUZA, 2017)

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. No respectivo trabalho, foram feitas simulações com o gás natural e hidrelétrica combinadas entre si, pois são as fontes de energia limpa utilizadas em maior escala no setor industrial. 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.

Considerando 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).

De acordo com Souza (2017) para cada equipamento foram escolhidas previamente algumas opções de potência nominal (elas serão mostradas no final do tópico 5.4). 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.

O sistema genérico do estudo de caso opera durante os sete dias da semana com três dias característicos, 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.

5.3 MODELAGEM

O método utilizado para modelar o sistema foi a programação linear. 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 para este trabalho 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, têm-se as seguintes variáveis de decisão:

$$X_j, \text{ onde } j = (t - 1).np + i \quad (5)$$

De acordo com Souza (2107) 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 47 e 47 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.

Lembrando que todas as equações e definições abaixo foram retiradas do trabalho de Souza (2017).

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.

$$X_{(t-1).np+18} - COP_{CA} \cdot X_{(t-1).np+17} = 0 \quad (6)$$

$$X_{(t-1).np+14} - \eta_{CR} \cdot X_{(t-1).np+6} = 0 \quad (7)$$

$$X_{(t-1).np+18} + X_{(t-1).np+19} = DEM_{AG} \quad (8)$$

$$X_{(t-1).np+16} = DEM_{VAP} \quad (9)$$

$$X_{(t-1).np+12} = DEM_{EE} \quad (10)$$

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X_{(t-1).np+3} \leq N_{rede} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+7} \leq N_{motor} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+13} \leq N_{cg} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+14} \leq N_{cr} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+15} \leq N_{ce} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+18} \leq N_{ca} \\ 0 \leq X_{(t-1).np+19} \leq N_{cc} \end{array} \right. \quad (11)$$

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:

$$0 \leq X_{(t-1).np+i} \leq \infty, \forall i = 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 17 \quad (12)$$

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 14.

$$VPL_{fin,amb} = VI_{fin,amb} + \mu_{fin,amb} VM_{fin,amb} \quad (13)$$

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 15 a 17.

$$VI_{fin,amb} = VI_{principal} + VI_{secundário} \quad (14)$$

$$VI_{principal} = \sum_{equip} k_{inv,equip} \cdot N_{equip} \quad (15)$$

$$VI_m = k_{inv,FL} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + k_{inv,EG} \cdot \max_{t=1,nt} (x_{(t-1)np+3}) + \quad (16)$$

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

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,

$$VM_{fin,amb} = VP + VE \quad (17)$$

$$VP = \frac{1}{2} \left[\max_{t=1, \frac{nt}{4}} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) + \max_{t=\frac{nt}{4}+1, \frac{nt}{2}} (x_{(t-1)np+3} \cdot h_t) \right] \mu_I \cdot k_{pow,high,I} + \quad (18)$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
VE = & \sum_{d=1}^6 \sum_{t=(d-1)\frac{nt}{12}+1}^{\frac{d \cdot nt}{12}} \left\{ k_{fuel,I} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + [h_t k_{energy,high,I} + (1-h_t) k_{energy,low,I}] x_{(t-1)np+3} \right. \\
& \left. - k_{sell,I} x_{(t-1)np+11} \right\} \cdot \tau_d + \\
& \sum_{d=7}^{12} \sum_{t=(d-1)\frac{nt}{12}+1}^{\frac{d \cdot nt}{12}} \left\{ k_{fuel,II} (x_{(t-1)np+1} + x_{(t-1)np+2}) + [h_t k_{energy,high,II} + (1-h_t) k_{energy,low,II}] x_{(t-1)np+3} \right. \\
& \left. - k_{sell,II} x_{(t-1)np+11} \right\} \cdot \tau_d
\end{aligned} \tag{19}$$

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

5.4 DADOS

Para todos os dados de tarifas elétricas, tarifas de gás natural 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 no tópico de 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 2019 teve valor médio de 6.5% a.a que equivale a 0.5417% a.m. Assim, obtêm-se um fator do valor presente financeiro (μ_{fin}) de 183,61 e um fator do valor presente ambiental igual (μ_{amb}) a 240. Observe que μ_{amb} corresponde ao número de meses do sistema, pois no ambiental o impacto não é amortizado e não tem juros.

Os valores de compra de energia foram convertidos em dólar, que possui cotação média de 3.7995 R\$/US\$ para o ano de 2019. Considerado um consumo de combustível de gás natural entre 10.001 a 25000 m³/dia a tabelas 2 apresenta os dados financeiros e ambientais do gás natural, respectivamente:

Tabela 2 - Dados para o gás natural.

Dado	Gás natural	Fonte
$tar_{comb}(US\$/m^3)$	0,52	(COPERGÁS, 2019a)
$PCI(kJ/m^3)$	35564,0	(COPERGÁS, 2019b)
$k_{combfin}(US\$/kwh)$	0,0526	(Calculado pela autora, 2019)
$k_{combamb}(kCO_2/kwh)$	0,203	(SOUZA, 2017)

Fonte: (COPERGAS et. al, 2019)

Considerando o grupo A de alta tensão e subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV, as tabelas 3 e 4 possuem os custos com a energia elétrica financeiros e ambientais, respectivamente.

Tabela 3 - Dados das tarifas elétricas de consumo e demanda no horário de ponta e ora de ponta.

Dado	Tarifa (US\$/kWh)	Fonte
k_{consHP}	0,11	(CELPE, 2019)
k_{consFP}	0,07	(CELPE, 2019)
k_{demHP}	1,09	(CELPE, 2019)
k_{demFP}	1,11	(CELPE, 2019)

Fonte: (CELPE, 2019)

Tabela 4 - Emissão de CO₂ para a produção de energia elétrica em função da matriz energética.

Dado	Emissão (kgCO ₂ /kWh)	Fonte
$k_{eeHIDREL}$	0,445	(SOUZA, 2017)

Fonte: (SOUZA, 2017)

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 (SOUZA, 2017).

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 5 - 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.

Fonte: (SOUZA, 2017)

Outro parâmetro necessário para a simulação computacional correta do sistema é o rendimento dos equipamentos que são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 6 - 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)

Fonte: (SOUZA, 2017)

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 (SOUZA, 2017).

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 7 - 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

Fonte: (SOUZA, 2017)

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. 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 (SOUZA, 2017).

Tabela 8 - 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			

Fonte: (SOUZA, 2017)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos estudos de caso da variação do gama, 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.

6.1 ESTUDO DE CASO: IMPACTO DA VARIAÇÃO DO GAMA NA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS TÉRMICOS

Nesse estudo foi proposto a inserção na métrica financeira uma variável que tem por definição cunho tanto financeiro quanto ambiental, a chamada tarifa de crédito de carbono, designada como γ , a inclusão dessa tarifa no processo de otimização só foi possível porque o sistema térmico simulado apresentava potencial de redução de emissão, se enquadrando assim nas exigências do MDL. Relembrando, a métrica desse estudo de caso tem o seguinte formato (equação 4):

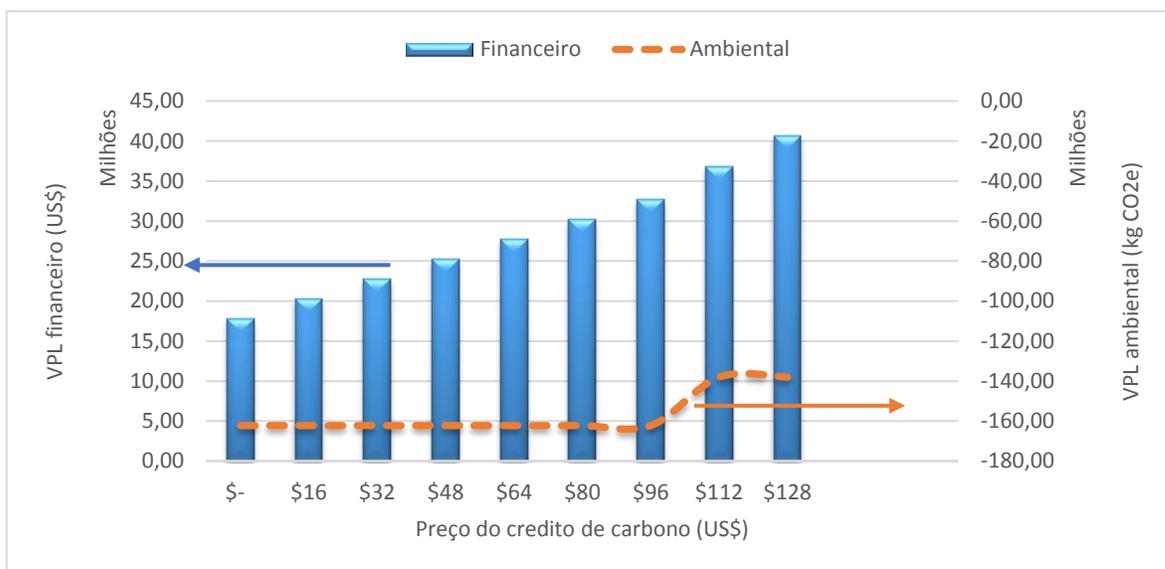
$$VPL_{\alpha=1, \gamma=[0, \infty]} = VPL_{cc} = VPL_{fin} + D_{amb} \cdot \gamma$$

No respectivo estudo de caso foi considerado a taxa de crédito carbono variando de $0 < \gamma < \text{US\$}128$ com passo de $\text{US\$}16$, pois o objetivo era realizar o estudo dentro de um intervalo mais próximo possível da perspectiva de valor monetário da tarifa de crédito de carbono estipulado pelos especialistas no prazo de 20 anos que é o tempo de operação do sistema em estudo.

Como resultado da equação 4 foi obtido os dois gráficos correspondentes a figura 3 e 4. Em ambos a leitura da linha na cor laranja é feita na ordenada do gráfico à direita do leitor enquanto que a leitura das barras na cor azul é feita na ordenada esquerda do gráfico à esquerda do leitor. No eixo das abscissas encontra-se a variação da tarifa de crédito de carbono com o respectivo passo de $\text{US\$}16$. Em linhas gerais é possível observar na figura 3 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 $\text{US\$}0$ a $\text{US\$}96$ e de $\text{US\$}96$ a $\text{US\$}128$) e uma faixa onde o VPL_{amb} aumenta consideravelmente (de $\text{US\$}96$ a $\text{US\$}128$). Lembrando que o VPL_{amb} possui valores negativos e diferentes do VPL_{fin} , pois o

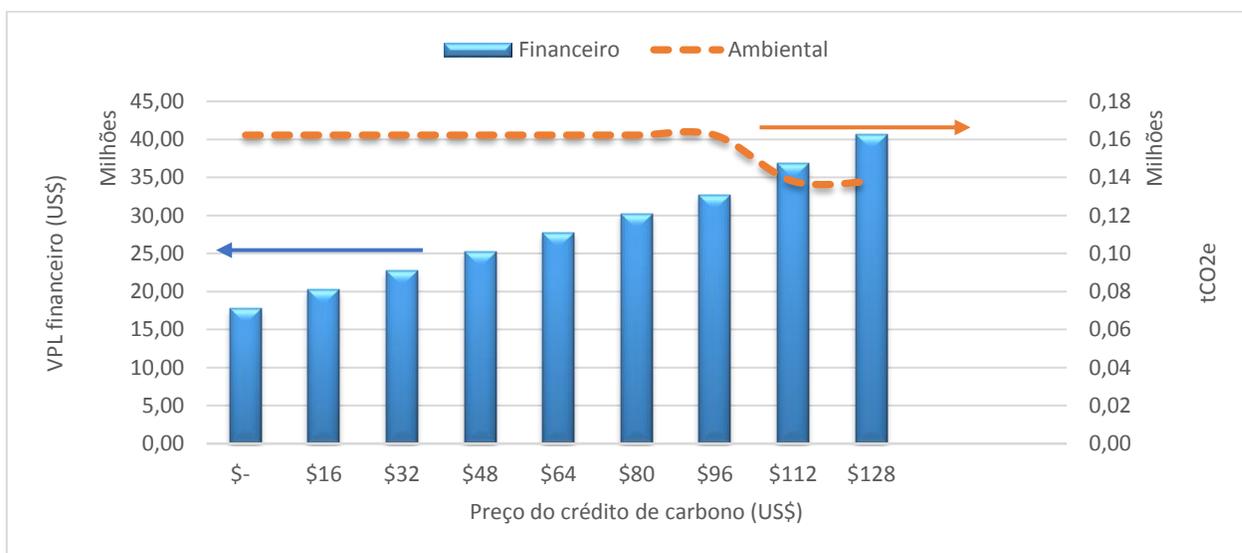
ambiental por se tratar de emissão de GEE representa uma perda de energia, enquanto que o VPL_{fin} representa a receita do projeto, ou seja, possui ganho financeiro com o suprimento da demanda.

Figura 3 - Variação do VPL financeiro e ambiental em função do preço do crédito de carbono.



Fonte: A autora

Figura 4 - Variação do VPL financeiro e da emissão de CO2 em função do preço do crédito de carbono.



Fonte: A autora

Para um melhor entendimento do comportamento observado nas figuras, a seguir serão analisadas as peculiaridades operacionais de cada ponto com o auxílio da tabela 9.

Tabela 9 - 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)							MD		VPL	
	GMG	REDE	CC	CA	CG	CE	CR	Fís.	Oper.	Financ. (10 ⁶ US\$)	Amb. (10 ⁶ tCO ₂ e)
0,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	-	-	17,76	0,16
16,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	20,26	0,16
32,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	22,75	0,16
48,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	25,24	0,16
64,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	27,73	0,16
80,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	30,22	0,16
96,0	1800	3000	3350	0	4500	0	0	NÃO	NÃO	32,71	0,16
112,0	1800	2500	1675	1675	5600	0	3000	SIM	SIM	36,82	0,13
128,0	1800	2500	1675	1675	5600	0	3000	NÃO	NÃO	40,61	0,13

Fonte: A autora

Com base na tabela acima é possível observar as seguintes variáveis:

γ : taxa de crédito de carbono

GMG: Grupo Motor Gerador

REDE: Rede Elétrica

CC: Chiller de Compressão

CA: Chiller de Absorção

CG: Caldeira a Gás

CE: Caldeira Elétrica

CR: Caldeira de Recuperação

MD Fís.: Mudança Física do Sistema

MD Oper.: Mudança Operacional do Sistema

VPL_{fin} : Valor Presente Líquido Financeiro

VPL_{amb} : Valor Presente Líquido Ambiental

Ressaltando que a mudança física é identificada quando há alteração de equipamento enquanto que a mudança operacional corresponde a variação na potência operacional. Como no primeiro ponto do estudo ($\gamma=0$) não há nenhuma referência anterior, então não se define mudança física e operacional do sistema em estudo. Além disso, é importante notar que o ponto de mínimo da tarifa do crédito de carbono do estudo de caso corresponde uma otimização focada 100% no financeiro e não há a inclusão da possibilidade de venda de crédito de carbono.

É possível observar que ao decorrer da variação de γ o sistema permanece com o mesmo modo de operação e compra os mesmos equipamentos, portanto, não houve nem mudança física, nem mudança operacional. Até o momento em que a tarifa de crédito de carbono atinge o valor de US\$96, observa-se que o VPL_{amb} é o mesmo, pois o sistema otimizado opera com os mesmos equipamentos e de mesmo modo em função do tempo, fazendo com que a redução de emissão de CO₂ seja constante. Enquanto o VPL_{fin} muda e aumenta gradativamente, pois, antes não havia ganho com a redução de emissão e agora a cada tonelada de CO₂ equivalente reduzida ganha-se um retorno financeiro que cresce proporcionalmente com o aumento da tarifa.

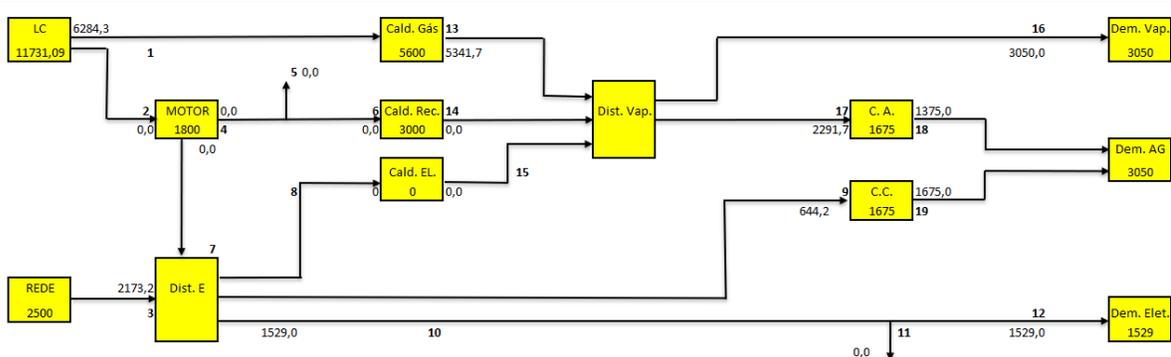
Quando a tarifa de crédito passou de US\$96 para US\$112 o sistema manteve a potência do motor, diminuiu a da rede e do chiller de compressão, aumentou o tamanho da caldeira a gás e comprou um chiller de absorção e uma caldeira de recuperação. Essa nova configuração traz uma redução na emissão em 18,75% e um aumento na receita de 11%. Note que esta mudança física proporcionou uma diminuição do impacto devido a diminuição na demanda de combustível pelo sistema. Com uma caldeira a gás 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 elétrico e menos combustível seja consumido. Além disso, tem-se a caldeira de recuperação que utiliza o calor que normalmente seria desperdiçado pela caldeira para gerar mais vapor e, conseqüentemente, diminuir a demanda de energia elétrica.

A partir de US\$112, o sistema volta a estabilizar a redução de emissão de CO₂. Esse resultado mostra que a partir desse valor, 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.

Na figura 5 é mostrada a potência nominal dos equipamentos necessária para suprir a demanda e a operação para tempo 19 e fator igual a US\$112. Ressaltando que os valores que estão fora da caixa correspondem a potência operacional enquanto que os valores dentro da caixa a potência nominal. Vale salientar que a potência operacional de saída dos equipamentos é sempre menor do que a de chegada devido a eficiência dos mesmos e essa potência de saída sempre menor que a potência nominal do respectivo equipamento.

Figura 5: Configuração do sistema base e sua operação para o tempo 19.



Fonte: A autora

Segundo estudo do Banco Mundial, para cumprir os compromissos do Acordo do Clima de Paris o preço da tonelada de carbono deveria estar entre US\$40 a US\$80 em 2020 e US\$50 a US\$100 em 2030. De acordo com o respectivo trabalho, caso a tarifa aumente para US\$112 corresponderá um aumento de até 45% na receita comparado com o seu preço atual que encontra-se variando de US\$16 a US\$32, ou seja, de fato ao aumentar a tarifa para o patamar de US\$100 estabelece uma forte política de preços para o carbono, que estimule, com incentivos, as tecnologias limpas e as energias renováveis.

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo teve como objetivo realizar uma análise atual de como o mercado de crédito de carbono está ambientado no Brasil e no mundo. Este mercado vem tendo crescente importância, dado a relevância das consequências das mudanças climáticas na vida da população do planeta. O Brasil possui um enorme potencial para se destacar numa economia de baixo carbono, pois apresenta capacidade de geração de energia solar e outras fontes renováveis maior do que praticamente todas as outras nações no mundo.

Também foi possível concluir que os ganhos financeiros foram bastante expressivos com a adequação do sistema otimizado às exigências do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL e, conseqüentemente, com a possibilidade de venda de créditos de carbono trouxeram também um bom compromisso com a métrica ambiental. Outro ponto importante foi a nítida necessidade de aumento da tarifa de crédito de carbono para viabilizar a mudança de configuração do sistema térmico ao utilizar tecnologias mais limpas e, assim, emitir menos dióxido de carbono equivalente, já que atualmente o valor da tarifa não dá um sinal efetivo para os agentes econômicos cumprirem as metas estabelecidas do Acordo de Paris. De acordo com o estudo de caso realizado no respectivo trabalho, uma tarifa de crédito de carbono de até US\$96 não é capaz de direcionar a otimização para sistemas mais limpos, já que não há mudança física e operacional. O valor efetivo da tarifa encontra-se em torno de US\$96 a US\$112, pois nesse intervalo mudanças na configuração do sistema são observadas, associadas a queda na emissão de CO₂ e aumento na receita. E a partir de US\$112 mesmo com o aumento da tarifa, o sistema não apresentou nenhuma mudança na sua configuração ótima, sendo observada a mesma taxa de emissão de CO₂.

Importante frisar que o setor industrial e de energia são os setores da atividade humana 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).

Além disso, de acordo com os estudiosos da área, há uma forte tendência da implementação da precificação de carbono via um mercado de carbono nacional. Logo, as empresas e instituições financeiras que tiverem essa percepção, poderão se destacar futuramente.

REFERÊNCIAS

SUPERINTERESSANTE. **Efeito Estufa:** Terra quente. Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/efeito-estufa-terra-quen/> Acesso em: 14 de agosto de 2018.

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

BM&BOVESPA. **Leilões de Crédito de Carbono**. Disponível em: http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/servicos/leiloes/credito-de-carbono/ Acesso em: 20 de maio de 2018.

CAMBRIDGE ECONOMETRICS. **An Impact Assessment of the Current Economic Downturn on UK CO2 Emissions:** A final report for the Committee on Climate Change. London: The Committee on Climate Change, 2009.

CARBONPRICINGLEADERSHIP. **Leading Economists:** A Strong Carbon Price Needed to Drive Large-Scale Climate Action. Disponível em: <https://www.carbonpricingleadership.org/news/2017/5/25/leading-economists-a-strong-carbon-price-needed-to-drive-large-scale-climate-action/> Acesso em: 05 de abril de 2019.

CEBDS. **O preço do carbono**. Disponível em: <https://cebds.org/blog/precificacao-de-carbono/#.XQpohIhKg2w/> Acesso em: 20 de maio de 2019.

CELPE. **Tabela de tarifas**. Superintendência de Regulação - SRE, , 2019.

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-ao-cliente/tarifas/#.WJ5obPkrLIV>>. Acesso em: 17 abril de 2019.

DI SOMMA, M. et al. **Multi-objective design optimization of distributed energy systems through cost and exergy assessments**. University of connecticut, storrs, 2017.

EU ETS. **EU Emissions Trading System**. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en/ Acesso em: 05 de abril de 2019.

FREITAS, L. A. **Estudo Energético e Econômico de Sistemas Térmicos de Fornecimento de Eletricidade e Água Gelada: o Caso dos Shopping Centers de Pernambuco**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

GODOY, Sara; SAES, Maria. Cap-and-trade e projetos de redução de emissões: comparativo entre mercados de carbono, evolução e desenvolvimento. **Scientific Electronic Library Online**, 2015.

GOVERNO DO BRASIL. **Estudo propõe medidas para cumprimento das metas do Acordo de Paris**. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2017/03/estudo-propoe-medidas-para-cumprimento-das-metas-do-acordo-de-paris/> Acesso em: 20 de outubro de 2018.

GUERRA, M. R. **Otimização De Sistemas De Cogeração Flexíveis Usando Método De Programação Linear**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

HEPBURN, ALEXA J. P. **Putting Aspiration Into Words: ‘Laugh Particles’, Managing Descriptive Trouble And Modulating Action**. 2011.

IPCC. **Working Group II**. Disponível em: <http://www.ipcc-wg2.awi.de/> Acesso em: 19 de novembro de 2018.

LAING, Tim; SATO, Misato; GRUBB, Michael; COMBERTI, Claudia. **“Assessing the effectiveness of the EU Emissions Trading System”**. Centre for Climate Change Economics and Policy, 2013. Disponível em: <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2014/02/WP106-effectiveness-eu-emissions-tradingsystem.pdf>. Acesso em: 02 de outubro de 2017.

MARKETS INSIDER. **Co2 European Emission Allowances**. Disponível em: <http://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>. Acesso em: 01 de junho de 2019.

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.

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**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

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**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

OLIVEIRA, G. L. B. **Estudo de Viabilidade Técnica e Financeira de Usinas Termelétricas a Várias Pressões, Temperaturas e Potências**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

ONUBR. **Mudanças Climáticas provocarão gastos de até US\$ 4 bilhões de com saúde, diz OMS**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mudancas-climaticas-provocarao-gastos-de-ate-us-4-bilhoes-com-saude-diz-oms/>>. Acesso em: 23 de agosto de 2017.

PUPPIM DE OLIVEIRA, J. A. **Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**. p. 159–178, 2005.

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.

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

SENADO FEDERAL. **Plenário aprova adesão do Brasil a segunda fase do protocolo de Kyoto**. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2017/12/07/plenario-aprova-adesao-do-brasil-a-segunda-fase-do-protocolo-de-kyoto/> Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

SOUZA, M. F. P. DE. **Estudo do impacto da tarifa do crédito de carbono sobre a otimização de sistemas térmicos**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

SOUZA, A. L. R. **Perfil do mercado de carbono no Brasil: Análise comparativa entre os mercados regulado e voluntário**. 2011.

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**. [s.l.: s.n.].

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

VON AVENARIUS, A.; SETTYGOWDA, D. T.; KIESEL, R. **An Empirical Comparison of Mandatory and Voluntary Carbon Credit Projects**. SSRN Electronic Journal, 2017.

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.

PETRÔNIO, P. S. **Estudo da habilidade de sistemas de cogeração em suportar variações financeiras**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

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.

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

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.

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.

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.

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.