

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VINÍCIUS SCHULTZ

**SIMULADOR PARA O MERCADO LIVRE DE ENERGIA:  
UMA ABORDAGEM SISTÊMICA E COMPETITIVA**

Porto Alegre  
2016

JOÃO VINÍCIUS SCHULTZ

**SIMULADOR PARA O MERCADO LIVRE DE ENERGIA:  
UMA ABORDAGEM SISTÊMICA E COMPETITIVA**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gladis Bordin

Porto Alegre  
2016

JOÃO VINÍCIUS SCHULTZ

**SIMULADOR PARA O MERCADO LIVRE DE ENERGIA:  
UMA ABORDAGEM SISTÊMICA E COMPETITIVA**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gladis Bordin, UFRGS

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Flávio Antônio Becon Lemos (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Cristiano Baumgarten (Eng. Mestrando) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Álvaro Garske Scarabelot (Eng.) – GV Energy & Associados

---

Ao meu pai, João Alberto Schultz e à minha mãe,  
Loni Maria Schultz.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, João e Loni pelo apoio incondicional e amparo em todos os momentos.

Ao meu irmão, Pedro pela camaradagem e companheirismo.

À minha namorada Franciele pela compreensão, carinho e apoio.

Aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial a Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gladis Bordin pela orientação e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

Aos Eng. Laurence de Andrade Rossetto e Eng. Álvaro Scarabelot pela dedicação em esclarecer minhas dúvidas.

Aos amigos Otávio, Rafaela, Gustavo e Luiz, pela amizade e convívio.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo. ”*

*(Albert Einstein)*

## RESUMO

O número crescente de agentes participando no Ambiente de Contratação Livre torna necessário a aplicação de novas ferramentas de análise do mercado de energia elétrica. Este trabalho apresenta um simulador para o mercado de energia elétrica elaborado com base nas técnicas de Dinâmica de Sistemas e Teoria dos Jogos. O simulador considera a atual estrutura do mercado de energia elétrica e a dinâmica entre seus agentes, com foco na comercialização e gestão de contratos de energia. Os resultados são apresentados na forma de cenários de participação de mercado, que, quando comparados, auxiliam os gestores na tomada de decisão.

**Palavras-chave:** mercado livre de energia, comercialização, dinâmica de sistemas, teoria dos jogos.

## **ABSTRACT**

The increasing number of agents participating in the Regulated Free Environment makes it necessary to apply new tools for analysis in this market. This paper presents a simulator for the electricity market based on System Dynamics and Game Theory techniques. The simulator takes into account the current structure of the electric sector and the dynamics among its economic agents, focusing on commercialization and management of energy contracts. The results are presented in the form of market share scenarios, which, when compared, assist managers in the decision-making process.

**Keywords:** Brazilian energy market, systems dynamics, game theory.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura Institucional de Sistema Elétrico.....	19
Figura 2 - Mercado de Energia Elétrica.....	21
Figura 3 - Metodologia para Avaliação da Participação de Mercado. ....	23
Figura 4 - Modelo de Difusão Logístico. ....	34
Figura 5 - Gráfico de Difusão do Modelo Logístico .....	35
Figura 6 - Modelo de Difusão de Bass. ....	36
Figura 7 - Gráfico de Saída do Modelo de Bass Aplicado a Migração para o ACL. ....	37
Figura 8 - Modelo de Migração de Consumidores para o ACL. ....	37
Figura 9 - Saída do Modelo Final Aplicado a Migração para o ACL; .....	38
Figura 10 - Curvas Isoprofit da Comercializadora A ( $\alpha_A = 1$ ).....	40
Figura 11 - Equilíbrio do Modelo de Cournot ( $\alpha_A = \alpha_B = 1$ ).....	41
Figura 12 - Curva de Preço de Mercado em Modelo com Restrição de Capacidade.....	42
Figura 13 - Funções de Lucro para Diferentes Estratégias de Preço.....	43
Figura 14 - Funções de Lucro para Comercializadoras com Capacidade Elevada .....	45
Figura 15 - Modo de Referência para o Modelo de Mercado. ....	52
Figura 16 - Diagrama de Consolidação do Modo de Referência .....	53
Figura 17 - DLC do Problema de PdM.....	54
Figura 18 - Diagrama de Troca de Informação entre Submodelos.....	55
Figura 19 - Submodelo de Contratos.....	55
Figura 20 - Fluxograma do Submodelo de Contratos .....	57
Figura 21 - Submodelo de Bertrand. ....	57
Figura 22 - Fluxograma do Submodelo de Bertrand .....	58
Figura 23 - Submodelo de Nash. ....	59
Figura 24 - Criação de Funções Personalizadas no Powersim. ....	60
Figura 25 - Fluxograma do Submodelo de Nash.....	61
Figura 26 - Submodelo Financeiro. ....	62
Figura 27 - Fluxograma do Submodelo Financeiro.....	63
Figura 28 - Submodelo de PdM.....	63
Figura 29 - Fluxograma do Submodelo de PdM .....	64
Figura 30 - Modelo Computacional Completo.....	65
Figura 31 - Cenário 1 - Preços Ofertados.....	67
Figura 32 - Cenário 1 - Participação de Mercado.....	68

Figura 33 - Cenário 1 - Investimento em Energia. ....	68
Figura 34 - Cenário 2 - Preços Ofertados. ....	69
Figura 35 - Cenário 2 - Investimento em Energia. ....	70
Figura 36 - Cenário 2 - Participação de Mercado. ....	70
Figura 37 - Número de consumidores livres do sudeste contratando energia no ACL. ....	71
Figura 38 - Gráfico de Referência para Análise de Sensibilidade com $PdM A = PdM B$ . ....	72
Figura 39 - Análise de Sensibilidade - Meta PdM. ....	73
Figura 40 - Análise de Sensibilidade - Margem Bruta. ....	73
Figura 41 - Análise de Sensibilidade - Reinvestimento. ....	74
Figura 42 - Análise de Sensibilidade das Mensalidades. ....	75
Figura 43 - Análise de Sensibilidade do Fator de Cobertura. ....	75
Figura B.1 - Referência para Análise de Sensibilidade em Mercado Coeso. ....	85
Figura B.2 - Análise de Sensibilidade - Meta de PdM em Mercado Coeso. ....	86
Figura B.3 - Análise de Sensibilidade - MB em Mercado Coeso. ....	87
Figura B.4 - Análise de Sensibilidade - Reinvestimento em Mercado Coeso. ....	87

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de consumidores.....	19
Quadro 2 - Requisitos de Modelagem. ....	25
Quadro 3 - O Dilema do Prisioneiro.....	26
Quadro 4 - Símbolos do Software Powersim Studio versão 10. ....	29
Quadro 5 - Técnicas de Modelagem para Divisão de Mercado. ....	32
Quadro 6 - Funções de Melhor Resposta da Comercializadora B.....	44
Quadro 7 - Jogo na forma Normal da Disputa de Mercado.....	44
Quadro 8 - Pseudocódigo do Algoritmo de Lemke-Howson. ....	47
Quadro 9 - Jogo na Forma Normal Exemplificando Lemke-Howson.....	48
Quadro 10 - Parâmetros da Simulação do Cenário 1.....	67
Quadro 11 - Parâmetros da Simulação do Cenário 2.....	69
Quadro 12 - Parâmetros de Referência para Análises de Sensibilidade.....	71
Quadro 13 - Análise de Sensibilidade da Meta de PdM.....	72
Quadro 14 - Análise de Sensibilidade da Margem Bruta Inicial. ....	73
Quadro 15 - Análise de Sensibilidade de Reinvestimento. ....	74
Quadro 16 - Análise de Sensibilidade das Mensalidades. ....	74
Quadro 17 - Análise de Sensibilidade do Fator de Cobertura. ....	75
Quadro A.1 - Algoritmo de Integração de Euler do Powersim. ....	83
Quadro A.2 - Algoritmo de Integração de Runge-Kutta de Segunda Ordem do Powersim.....	83
Quadro B.1 - Parâmetros de Referência .....	85
Quadro B.2 - Análise de Sensibilidade das Meta de PdM .....	86
Quadro B.3 - Análise de Sensibilidade da Margem Bruta Inicial .....	86
Quadro B.4 - Análise de Sensibilidade Reinvestimento.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEO	<i>Chief Executive Officer</i>
CLC	Consumidor Livre Contratando
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
CS	Consumidores no <i>Spot</i>
CVA	Conta de Variação da Parcela A
DAML	Demanda Agregada Mercado Livre
DCL	Demanda Consumidores Livres
DCS	Demanda Consumidores <i>Spot</i>
DCSC	Demanda Consumidores <i>Spot</i> Cumulativa
DLL	<i>Dynamic Link Library</i>
DP	Dilema do Prisioneiro
DS	Dinâmica de Sistemas
DSA	Demanda <i>Spot</i> Atendida
DSE	Demanda <i>Spot</i> Equilíbrio
DSP	Demanda <i>Spot</i> Potencial
EPD	Elasticidade do Preço na Demanda
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FM	Faturamento Mensalidades
LCP	<i>Linear Complementarity Problem</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
MB	Margem Bruta
MR	Modo de Referência
MWmed	Megawatt Médio
MWh	Megawatt Hora

PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PdM	Participação de Mercado
PE	Preço Equilíbrio
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
RMB	Reajuste Margem Bruta
SCL	Sistema de Contabilização e Liquidação
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
TJ	Teoria dos Jogos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	14
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	14
1.3	OBJETIVO .....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>O MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	ESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO .....	16
2.2	OS CONCEITOS DE MERCADO E DEMANDA .....	20
2.3	METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DE MERCADO .....	22
2.4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	24
2.5	TEORIA DOS JOGOS .....	25
2.6	DINÂMICA DE SISTEMAS .....	28
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	32
<b>3</b>	<b>MODELOS PARA ANÁLISE DE MERCADO .....</b>	<b>34</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	34
3.2	O MODELO DE DIFUSÃO.....	34
3.3	O MODELO DE COURNOT .....	38
3.4	O MODELO DE BERTRAND .....	41
3.5	O ALGORITMO DE LEMKE-HOWSON .....	45
<b>4</b>	<b>MODELO PROPOSTO .....</b>	<b>50</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	50
4.2	PREMISSAS .....	50
4.3	CONHECENDO O SISTEMA.....	50
4.4	DETERMINAÇÃO DO MODO DE REFERÊNCIA .....	52
4.5	DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL .....	53
4.6	O MODELO COMPUTACIONAL .....	54
<b>4.6.1.</b>	<b>Submodelo de Contratos .....</b>	<b>55</b>
<b>4.6.2.</b>	<b>Submodelo de Bertrand .....</b>	<b>57</b>
<b>4.6.3.</b>	<b>Submodelo de Nash .....</b>	<b>59</b>
<b>4.6.4.</b>	<b>Submodelo Financeiro.....</b>	<b>61</b>
<b>4.6.5.</b>	<b>Submodelo de Participação de Mercado .....</b>	<b>63</b>
4.7	ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS .....	65

<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES, RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>67</b>
5.1	CENÁRIO 1: COOPERAÇÃO .....	67
5.2	CENÁRIO 2: COMPETIÇÃO E LIDERANÇA DE MERCADO .....	69
5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	71
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>77</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	77
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	77
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO POWERSIM STUDIO.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COMPLEMENTAR.....</b>	<b>85</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A energia elétrica, diferentemente de outras commodities, é produzida e consumida simultaneamente. Não há como fazer provisões de energia elétrica ou comercializar estoques com outros países. Essa característica faz com que a ligação entre o produtor e o consumidor de energia seja constante e forma uma estrutura muito particular de mercado. No intuito de dar robustez ao setor elétrico e incentivar sua expansão, o modelo do setor elétrico brasileiro foi desverticalizado, abrindo espaço para a entrada de novos agentes, como comercializadoras de energia elétrica e gestoras de contratos de energia, neste trabalho denominados comercializadora e gestora.

Os novos agentes aumentaram a liquidez dos contratos de energia elétrica no mercado livre (CCEE, 2014). A atividade desses agentes alterou a dinâmica do mercado, pois fornece aos consumidores novas alternativas de transacionar energia. No entanto, surge um problema relevante e complexo no que compete ao planejamento estratégico desses agentes quanto à projeção de demanda ou, no ramo empresarial, estudo de mercado. Faz-se então necessário o desenvolvimento de um novo modelo de simulação e análise do mercado de energia elétrica que contemple o posicionamento estratégico dos agentes no ambiente competitivo.

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A partir da reestruturação do setor elétrico no final da década de 90, empresas privadas ingressaram no mercado. Os consumidores foram classificados em cativos, especiais e livres. Os dois últimos não estão mais necessariamente vinculados a uma empresa distribuidora que detém a concessão na sua área de atuação, ou seja, a eles é permitido contratar energia proveniente de outras empresas além da sua distribuidora local.

Nesse ambiente competitivo, as distribuidoras adotam estratégias de retenção de grandes consumidores, as comercializadoras e gestoras competem entre si para ampliar sua carteira de clientes. Assim, a demanda das comercializadoras e gestoras dependerá de decisões estratégicas para conquistar e reter sua base de clientes. Nesse cenário, os modelos tradicionais de projeção de demanda a partir de dados econométricos tornam-se inadequados, sendo assim fez-se necessário o desenvolvimento de novos modelos que permitem agregar, também, a característica competitiva entre os agentes.

### 1.3 OBJETIVO

Desenvolver um modelo para projetar a demanda de empresas comercializadoras e gestoras em ambiente competitivo, considerando a movimentação estratégica tanto dos “*players*” quanto dos consumidores, com base em Dinâmica de Sistemas e Teoria dos Jogos.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar o objetivo proposto, este trabalho está estruturado em seis capítulos, como indicado a seguir.

O Capítulo 2 descreve o problema da participação de mercado em ambiente competitivo. Para isso, são formalizados os conceitos de demanda utilizados neste trabalho e descritos tanto a estrutura do setor elétrico quanto a metodologia para o planejamento da demanda empresarial. As possibilidades de solução do problema através das técnicas de Teoria dos Jogos e Dinâmica de Sistemas também são abordadas.

O Capítulo 3 apresenta um conjunto de modelos aplicados à disputa de mercado, que fundamentam o modelo proposto no Capítulo 4. O Capítulo 4 descreve o modelo proposto e as etapas de construção do simulador desenvolvido para analisar a dinâmica empresarial no mercado livre de energia.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação do simulador na análise de dois cenários e a análise de sensibilidade. O Capítulo 6 descreve as considerações finais deste trabalho e indica melhoramentos futuros.

## 2 O MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica, essa *commodity* essencial para o conforto e segurança da vida moderna, apresenta características de produção, transporte e consumo que a distingue de qualquer outro produto. Inicialmente, as dificuldades de armazená-la a tornam extremamente um produto com características próprias, fazendo com que o montante produzido deve ser, necessariamente, aquilo que é demandado pelo mercado, agregando as perdas de transporte. Outra particularidade é o fato de que não se pode aumentar a capacidade de produção no curto prazo, são necessários vultuosos investimentos e um longo período de desenvolvimento para colocar em operação um empreendimento de geração. Por último, a forma como a energia elétrica é transmitida e distribuída segue leis físicas, não de mercado, desta forma é preciso implementar sistemas de transmissão e sistemas de distribuição de elevada complexidade técnica a fim de atender da melhor forma possível a necessidade atual e futura dos consumidores.

A impossibilidade de estocagem, de previsão da demanda instantânea e de imposição uma direção e sentido para o fluxo de energia na rede criam desafios para o planejamento, operação e comercialização desta *commodity*. Desta forma, para oferecer energia elétrica com qualidade, segurança e confiabilidade, faz-se necessário prever a expansão da capacidade de geração, desenvolver um sistema robusto de transmissão e uma operação coordenada e monitorada.

Este capítulo objetiva uma breve descrição da reestruturação do setor, do modelo institucional e dos principais conceitos sobre o mercado de energia elétrica, buscando contextualizar o tema investigado no presente trabalho.

### 2.1 ESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A evolução da indústria de energia elétrica nas últimas décadas têm sido no sentido de criar uma estrutura de mercado, através da separação de funções entre os agentes econômicos e atividades regulatórias por parte do governo. Essa desverticalização do setor, ou seja, a divisão entre as atividades de geração, transmissão e distribuição, também fez surgir outro segmento, a comercialização de energia.

O marco para a reestruturação do setor elétrico foi a promulgação da Lei de Concessões de 1995 (Lei 8.987 de 13 de fevereiro de 1995 e Lei 9.074 de 7 de julho de 1995). Nelas estão estabelecidos os critérios de concessão, os direitos e deveres dos usuários, a política

tarifária, entre outras regulações do setor. Afim de atender a essa nova estrutura, criaram-se os seguintes órgãos e regulamentações:

- Criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cujas competências são a regulação tarifária, implementação das políticas e diretrizes do governo federal para a exploração da energia elétrica e o aproveitamento dos potenciais hidráulicos, e definição das condições gerais de contratação do acesso e uso dos sistemas de transmissão e distribuição (Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996);
- Criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela coordenação e controle das operações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), tendo suas atividades fiscalizadas e reguladas pela ANEEL (Lei nº 9.648, de 26 de agosto de 1998);
- Necessidade de autorização, por parte da ANEEL, de compra e venda de energia elétrica, por agente comercializador. Além da regulamentação da produção e consumo no mercado atacadista, criou os consumidores livres e especiais (Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995);
- Proibição as empresas transmissoras de comercializarem energia e estabelecimento, por parte da ANEEL, dos valores das receitas anuais permitidas a estas empresas (Resolução ANEEL nº 142 de 1999);
- Definição da composição da Rede Básica do sistema elétrico interligado brasileiro, suas conexões e as respectivas empresas usuárias das instalações (Resolução ANEEL nº 66 de 1999).

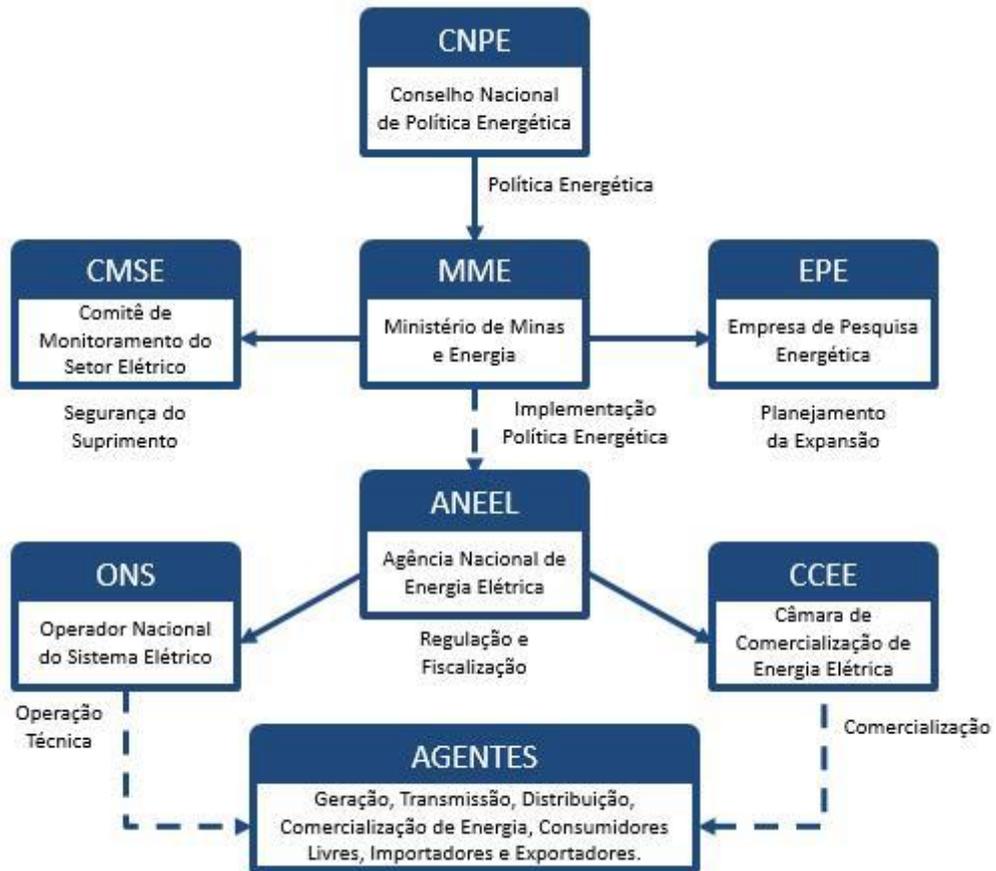
Ainda, neste mesmo período, definiu-se o livre acesso a redes de transmissão e distribuição, estabeleceu-se instrumentos contratuais de comercialização de energia e de uso do sistema de transmissão. Mais tarde, em 2003 e 2004, o governo adota novas medidas para a estruturação do Setor Elétrico Brasileiro. São deste período:

- Criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável por realizar estudos que subsidiem o planejamento do setor energético (Lei 10.847, de 15 de Março de 2004);
- Criação do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), cuja função é de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional (Lei 10.848, de 15 de março de 2004);
- Substituição do Mercado Atacadista de Energia, criado em 2002 pela Lei nº 10.433, por uma nova instituição, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (Lei no 10.848, de 15 de março de 2004).

É válido salientar que se ampliou a autonomia do ONS através das alterações introduzidas pela Lei nº 10.848 de 2004 e pelo Decreto nº 5.081 de 2004 além de atribuir o Poder Cedente ao Ministério de Minas e Energia (MME). Criam-se também dois ambientes de contratação distintos, o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulado (ACR). A estrutura final do atual setor elétrico é representada pela Figura 1, onde é representada hierarquia e as atribuições de cada órgão.

No Ambiente de Contratação Livre, regulado pela CCEE, foram estabelecidos os critérios para a classificação dos consumidores e flexibilização de tarifas para aqueles que contratam fontes incentivadas. Entende-se por fontes incentivada as usinas de biomassa, eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e solar. Os consumidores conectados antes de oito de julho de 1995 são chamados de antigos e estão sujeitos a restrições devido a classe de tensão (ABRACEEL, 2016). Segundo (CPFL, 2016), o consumidor especial é aquele cuja demanda contratada é igual ou superior a 500 kW, individualmente ou por comunhão de fato (mesmo endereço) ou de direito (mesmo CNPJ). A classificação dos consumidores e as condições para ingressarem no ACL são resumidas no Quadro 1.

Figura 1 - Estrutura Institucional de Sistema Elétrico.



Fonte: Adaptado de ONS (2016).

No Quadro 1 está presente, além dos consumidores integrantes do ACL, a figura do consumidor Potencialmente Livre, ou seja, aquele que possui demanda contratada suficiente para migrar para o mercado livre, mas opta por não o fazer. Estes consumidores, que compõem parte da base de consumidores (BdC) das distribuidoras, são o alvo de estratégias de marketing para a ampliação da carteira de clientes das comercializadoras.

Quadro 1 - Classificação de consumidores.

Consumidor	Demanda Contratada	Classe de Tensão	Fonte de Energia
Livre (antigo)	$\geq 3.000\text{kW}$	$\geq 69 \text{ kV}$	Convencional ou Incentivada
Livre (novo)	$\geq 3.000\text{kW}$	Qualquer	Convencional ou Incentivada
Especial	$> 500\text{kW}$ e $< 3.000\text{kW}$	Qualquer	Incentivada
Potencialmente Livre	$\geq 3.000\text{kW}$	Qualquer	Convencional ou Incentivada

Fonte: Adaptado de MERCADO LIVRE DE ENERGIA ELÉTRICA (2014).

Nota: Consumidores novos são aqueles conectados a rede após 8/7/1995.

À medida que o setor elétrico se reestruturou, adaptando-se ao contexto de desverticalização e aumentando a participação do capital privado, novas estruturas e agentes econômicos se fizeram necessários. Neste contexto, a metodologia de planejamento da expansão deve agregar, além de indicadores macroeconômicos, fatores de mercado os quais caracterizam o ambiente competitivo e cooperativo.

## 2.2 OS CONCEITOS DE MERCADO E DEMANDA

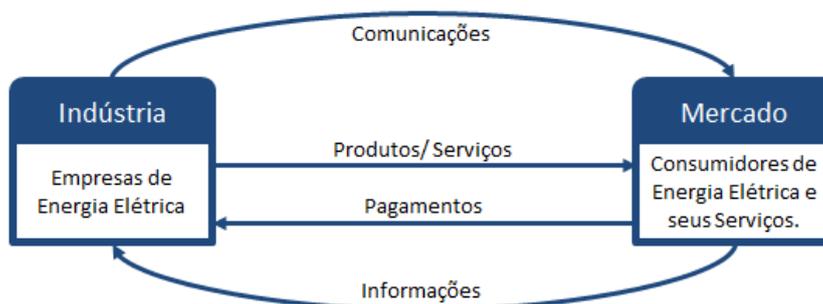
Em uma economia moderna a realização de qualquer atividade é acompanhada de estudos, mesmo que superficiais, de mercado. Este ambiente competitivo faz com que, mesmo as empresas que realizam as atividades mais básicas e fundamentais da cadeia produtiva, necessitem de estudos de mercado a fim de maximizar seus lucros. Neste sentido, é válido conceituar o que é mercado e classificar os tipos de demanda conforme a teoria clássica de marketing.

A economia definiu mercado como local em que vendedores e compradores transacionam um produto e serviços. Para Kotler, no entanto, este conceito é mais abrangente: "O mercado consiste em todos os consumidores potenciais que compartilham uma necessidade ou desejo específico, dispostos e habilitados para fazer uma troca que satisfaça essa necessidade ou desejo"(KOTLER, 1998). Assim, no marketing os vendedores são vistos como a indústria e os compradores constituem o mercado.

Segundo Bordin (2000), na indústria de energia elétrica o termo "mercado" tem sido utilizado em ambos os sentidos. As "projeções de mercado", são, em alguns casos, uma projeção de demanda realizada pelas empresas e, em outros, a expectativa dos agentes em relação ao comportamento do mercado livre.

O mercado de energia elétrica (Figura 2) se insere neste conceito. Há nele, de um lado, os vendedores de energia elétrica, que são atualmente as empresas geradoras, distribuidoras e as comercializadoras. Do outro há os consumidores que compram e utilizam a energia para diversos fins. Serviços auxiliares de energia, como transmissão e consultoria também fazem parte do mercado, tendo como compradores um público alvo mais restrito.

Figura 2 - Mercado de Energia Elétrica.



Fonte: adaptado de Bordin (2000), apud Figura 1.3 de (KOTLER, 1998).

Em suma, empresas vendem o produto energia elétrica, desenvolvem serviços de transmissão, distribuição, consultoria e informação (estudos de viabilidade, monitoramento de consumo, modelagem de contratos, etc). O fluxo de informações, antes restrito em um mercado centralizado nas estatais, é atualmente dinâmico devido a necessidade de interação das empresas com o mercado.

Conforme a literatura clássica de marketing (KOTLER, 1998), os tipos de mercado e demanda podem ser definidos por:

- Mercado Potencial é o conjunto de consumidores que manifestam interesse suficiente pela oferta de um produto ou serviço.

Os consumidores potenciais são, no que tange ao mercado livre de energia, todos os consumidores que manifestam interesse de deixar o mercado cativo. Embora as políticas públicas tenham disseminado o acesso à energia elétrica, ainda há uma grande barreira de acesso ao mercado livre. Por isso, não basta ter interesse, é preciso ter renda e acesso ao produto, ou seja, é necessário ser qualificado.

- Mercado Disponível é o conjunto de consumidores que tem interesse, renda e acesso a uma determinada oferta.

Analisando o caso de uma comercializadora que compete com uma distribuidora por uma fatia do seu mercado. O mercado disponível da distribuidora é muito mais abrangente do que o da comercializadora, uma vez que não há barreiras de acesso para o consumo de energia elétrica. Para a comercializadora, entretanto, somente os consumidores que se enquadram na faixa de demanda discutidas no Quadro 1 possuem a qualificação para sua oferta.

- Mercado Alvo ou Mercado Atendido é parte do mercado atendido qualificado no qual a empresa decide focar sua estratégia e recursos de marketing.

Considerando o cenário anterior é possível imaginar que os custos de migração tornam pouco atrativos para a empresa, em um primeiro momento, os consumidores especiais. Por isso,

o mercado alvo são os clientes da distribuidora com porte para ingressar diretamente no mercado como livres. Desta forma, o mercado alvo da comercializadora é composto dos clientes da distribuidora com demanda superior a 3.000kW.

- Mercado Penetrado é o conjunto de consumidores que já adquiriram o produto.

As empresas distribuidoras ainda planejam sua demanda a partir do mercado penetrado, sendo este composto por consumidores cativos dentro da sua área de concessão. Outros agentes, todavia, não possuem as mesmas restrições, podendo, portanto, projetar seus mercados a partir das metas de ampliação de consumidores em mercados alvo, expansão do mercado disponível através de pressão política por flexibilização das regras de migração e expandir seu mercado atendido através da aquisição de concorrentes.

A demanda é, segundo a teoria microeconômica, a quantidade de um bem ou serviço que um consumidor está disposto a adquirir por um determinado custo e em um determinado momento. Existem dois tipos importantes de demanda:

- Demanda de Mercado é o volume total de produtos/serviços que seriam adquiridos por um conjunto de consumidores em condições específicas de localização e tempo;
- Demanda da Empresa é sua participação na demanda de mercado.

Neste trabalho, seguindo a terminologia adotada por Bordin (2000), o termo **demanda** é utilizado como referência aos consumidores enquanto o termo **mercado** engloba tanto consumidores quanto as empresas da indústria de energia elétrica. Cabe destacar que no caso do setor elétrico há duas dimensões para a demanda: a demanda máxima (potência) e a demanda média (energia).

### 2.3 METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DE MERCADO

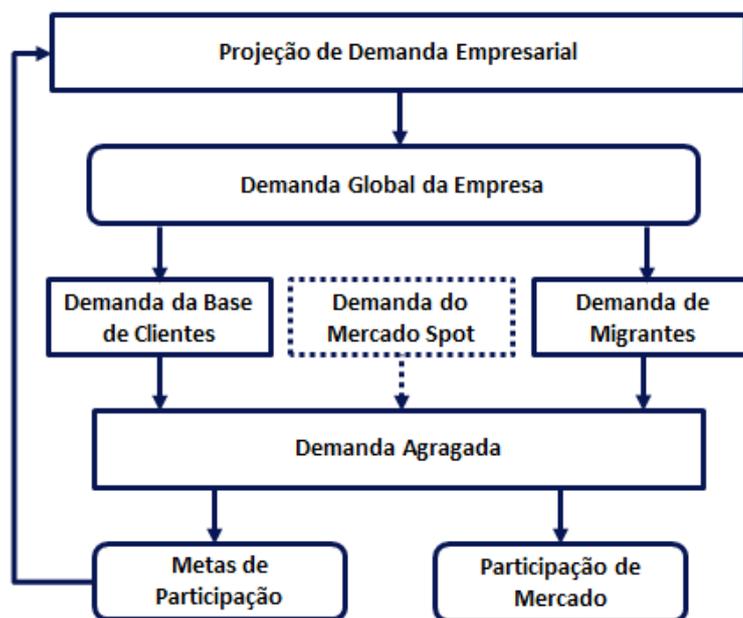
A participação de mercado (PdM) de empresas geradoras é definida pelos volumes e preços de energia negociados em contratos com os demais agentes. A distribuidora, no entanto, tem sua participação restrita ao volume contratado pelos seus clientes cativos na sua área de concessão acrescida dos clientes livres que retornam ao mercado cativo ou mantém parte da sua demanda neste mercado.

Empresas de comercialização tem sua PdM, em um primeiro momento, baseada em uma posição prévia que é reavaliada pela gestão no processo de planejamento, em função da projeção da demanda livre e metas de participação, definidos pela estratégia da empresa. As gestoras de contrato têm a sua PdM definida de forma análoga as comercializadoras.

O presente estudo visa analisar estrutura do problema de divisão de mercado entre os agentes integrantes do SEB que lidam diretamente com os consumidores finais, ou seja, distribuidoras, comercializadoras e gestoras. A estrutura do problema para "n" empresas de cada tipo é semelhante ao modelo para duas empresas por tipo. Situação semelhante foi tratada por (BORDIN, 2000), empregando Teoria dos Jogos e Dinâmica de Sistemas, em um modelo de estudos de demanda em ambiente competitivo no qual empresas que realizavam ambas as funções de distribuição e comercialização competiam por um mercado de consumidores livres, potencialmente livres.

A metodologia proposta para a avaliação da participação de mercado está representada na Figura 3. Inicialmente a empresa projeta sua demanda com base na sua meta de participação de mercado, definida conforme sua estratégia de mercado e na demanda história da sua base de clientes, livres e especiais. A demanda global da empresa é composta da demanda de sua base de clientes somada a demanda dos clientes migrantes ao mercado livre.

Figura 3 - Metodologia para Avaliação da Participação de Mercado.



Fonte: Adaptado de Bordin (2000).

A demanda agregada da comercializadora inclui, além da demanda da base de clientes livres e especiais, a demanda dos migrantes e a demanda do mercado *spot*, se a comercializadora estiver em condições de atender. Com base na posição final de mercado é calculada a participação da empresa, são traçadas novas metas de participação e políticas para atingi-las.

## 2.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No modelo atual do mercado de energia elétrica brasileiro, o problema de definição da participação de mercado (PdM) por agente leva em conta área de concessão (para distribuidoras), e critérios de mercado para consumidores livres, especiais e potencialmente livres. Como se verificou nos últimos anos, há uma tendência geral de flexibilização das normas para os consumidores livres, sendo assim a importância dos critérios de mercado tem aumentado em detrimento dos critérios da área de concessão.

Os modelos desenvolvidos devem contemplar não somente aspectos técnicos como também aspectos estratégicos. A definição de estratégia empresarial é vasta, devido a evolução de diversos conceitos ao longo do tempo, introduzidos por diferentes correntes teóricas sobre o assunto.

Chandler, na década de 60, introduz um conceito formal do pensamento estratégico ao afirmar que estratégia é *“a determinação das metas e dos objetivos básicos de uma empresa para o longo prazo, assim como a adoção de cursos de ação e a alocação dos recursos necessários para atingir essas metas”* (ALFRED D. CHANDLER JR., 1962, p.16). O conceito de Chandler trata a estratégia como um processo de concepção no sentido de alocação ótima de recursos.

Logo após, surge a ideia de que o planejamento estratégico determinava o contexto da empresa em um ambiente externo de constante mutação e a influência que a empresa tem sobre este ambiente. São desta época a definição de Igor Ansoff ressaltando que *“a estratégia é um conjunto de regras de tomada de decisão em condições de desconhecimento parcial. As decisões estratégicas dizem respeito à relação entre a empresa e o seu ecossistema”* (ANSOFF, 1977, p.52).

Após a década de 80 dois importantes autores agregam novos conceitos à estratégia empresarial. Porter introduz o conceito de competição: *“a essência da formulação estratégica é lidar com a competição”* (PORTER, 1989), e Ohmae, que foca na necessidade dos clientes como primeira prioridade para uma estratégia real, devendo a estratégia evitar a competição sempre que possível (OHMAE, 1988).

Outros autores contemporâneos como Kim e Maubourgne, em seu famoso *best-seller* "A estratégia do Oceano Azul", acrescentam o conceito de inovação para dentro da estratégia empresarial. Todos estes conceitos demonstram a abrangência da estratégia empresarial, que contempla alocação de recursos, tomada de decisão em ambiente com informações incompletas, competição e atendimento as necessidades dos clientes.

Neste trabalho analisa-se tomada de decisão de duas empresas com metas de PdM definidas em seus planejamentos estratégicos. A opção de trabalhar com este número de empresas decorre do fato de que é preciso inicialmente criar o conhecimento acerca do comportamento do sistema de forma simplificada. Além disso, aplicar técnicas de solução de teoria dos jogos para situações com mais de dois jogadores requer algoritmos mais complexos, dificultando a implementação em um *software* fechado como o Powersim.

A solução do problema de PdM apresenta um grande desafio quando introduzido o comportamento estratégico dos agentes. Além disso, outros aspectos também relacionados às características de um mercado competitivo devem ser considerados na modelagem do sistema, como apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 - Requisitos de Modelagem.

Consequências da Competição	Requisitos de Modelagem
<p>Maior incerteza com relação à demanda a ser atendida;</p> <p>Maior incerteza com relação aos preços.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapidez de resposta dos modelos;</li> <li>• Facilidade de gerar cenários de preços;</li> <li>• Flexibilidade para simulação.</li> </ul>
<p>Reação de consumidores a variação de preço;</p> <p>Poder de barganha;</p> <p>Capacidade da empresa de atender à expansão.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representar comportamentos estratégicos;</li> <li>• Representar laço de realimentação de preço;</li> <li>• Simular efeitos da política de preços da concorrência.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Bordin (2000).

A necessidade de incorporar, em uma mesma estrutura, características técnicas (sistema elétrico) e comportamentos estratégicos (mercado de energia elétrica) tornam a modelagem complexa. Sendo assim, duas técnicas de abordagem do problema são estudadas: teoria dos jogos (*game theory*) e dinâmica de sistemas (*system dynamics*). Os resultados desta análise são apresentados a seguir.

## 2.5 TEORIA DOS JOGOS

A Teoria dos Jogos (TJ), desde sua concepção em 1944 por Von Neumann e Morgenstern (VON NEUMANN; MORGENSTERN, 2007), confere um tratamento matemático a situações onde múltiplos agentes são tomadores de decisão e essas situações interferem diretamente nas preferências e benefícios de cada um (RASOULI, 2010). Um jogo é definido como um evento no qual “*n*” jogadores possuem um conjunto “*A*” de ações onde a função utilidade “*u*” mapeia os resultados obtidos por cada conjunto de ação.

Definição de Jogo na Forma Normal: A definição formal de um jogo na forma normal (finito,  $n$ -jogadores), segundo (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008), é de um conjunto de variáveis  $(N, A, u)$ , onde:

- $N$  é um conjunto finito de  $n$  jogadores, indexados por  $i$ ;
  - $A = A_1 \times \dots \times A_n$ , onde  $A_i$  é o conjunto finito de ações disponíveis ao jogador  $i$ .
- Cada vetor  $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$  é chamado de perfil de ação e,
- $u = (u_1, \dots, u_n)$ , onde  $u_i: A \rightarrow \mathbb{R}$  é a função utilidade para o jogador  $i$ .

Existem diversos tipos de jogos, cooperativos, não cooperativos, simétricos, assimétricos, extensivos, bayesianos, simultâneos, de informação perfeita e imperfeita, entre outros que fogem ao escopo deste trabalho. Um jogo relativamente importante foi abordado por Melvin Dresher e Merrill Flood (FLOOD; DRESHER, 1958), ele seria mais tarde nomeado “Dilema do Prisioneiro” (DP) por Albert W. Tucker.

Há muitas versões da história do DP para embasar a escolha dos números. Segundo Shoham e Leyton-Brown (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008) os jogadores são dois prisioneiros suspeitos de um crime. Eles estão em duas salas separadas de interrogatório aonde lhes são dadas as opções de “confessar” e “negar” o crime. Ao primeiro prisioneiro (P1) é dada a informação de que se ele confessar (C) e o outro prisioneiro (P2) também confessar (C), ambos são condenados a cumprir pena por um ano. Se, no entanto, P1 escolher confessar (C) e P2 negar (N), P1 será condenado a quatro anos enquanto o outro (P2) não é condenado. Se ambos escolherem  $N$ , os dois cumprirão 3 anos de sentença.

Quadro 3 - O Dilema do Prisioneiro.

		P2	
		C	N
P1	C	-1,-1	-4, 0
	N	0,-4	-3,-3

Fonte: Adaptado de Shoham e Leyton-brown (2008).

O Quadro 3 é a representação do DP na forma normal. A melhor resposta do jogador P1 e P2 é  $N$ . Observa-se isso analisando o jogo do ponto de vista do jogador P1. Caso P2 escolha  $C$ , a menor pena para P1 é obtida se ele escolher  $N$ . Se P2 escolher  $N$ , a menor pena também é obtida se P1 optar por  $N$ . Neste jogo o equilíbrio de Nash (NASH, 1950) é de fato o conjunto  $(N, N)$ , ou seja, quando a estratégia de escolha de cada jogador é a melhor resposta a estratégia escolhida pelos demais. Observa-se que caso ambos os jogadores escolham  $C$ , a pena seria menor do que o ponto de equilíbrio de Nash.

As estratégias do ponto de vista da Teoria dos Jogos podem ser de dois tipos, estratégias puras e estratégias mistas. No exemplo anterior, do dilema do prisioneiro, utilizou-

se apenas uma estratégia pura, ou seja, cada jogador selecionou apenas uma de suas possíveis ações e a jogou (C ou N). Os jogadores também poderiam aleatorizar suas escolhas sobre o conjunto de ações disponíveis de acordo com uma distribuição de probabilidades. Essa é a chamada estratégia mista.

Definição de Estratégia Mista: Seja  $(N, A, u)$  um jogo na forma normal, para qualquer conjunto  $X$ ,  $P(X)$  é o conjunto de todas as distribuições de probabilidade sobre  $X$ . Então o conjunto de estratégias mistas para o jogador  $i$ , de acordo com (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008), é dado por  $S_i = P(A_i)$ .

Quando os jogadores escolheram suas ações de forma simultânea no dilema do prisioneiro, a utilidade obtida ou *payoff* para cada um é facilmente determinada pelos valores dentro da matriz do jogo. Quando a estratégia é mista, no entanto, fala-se em utilidade esperada, pois é preciso considerar a probabilidade de se atingir cada resultado do conjunto de estratégia e ponderar suas utilidades pela probabilidade de cada resultado.

Definição Utilidade Esperada em Estratégia Mista: Dado um jogo na forma normal  $(N, A, u)$ , a utilidade esperada  $u_i$  para o jogador  $i$ , segundo (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008), é dado pela Equação (1).

$$u_i(s) = \sum_{a \in A} u_i(a_i) \prod_{j=1}^n s_j(a_j) \quad (1)$$

Onde  $s_j(a_j)$  é a probabilidade da ação  $a_j$  ser jogada na estratégia mista  $s_j$  e  $u_i(a_i)$  é a utilidade obtida ao ser jogada a ação  $a_i$ .

O consumidor de energia elétrica está, em geral, interessado na melhor oferta, ou seja, na estratégia ótima (*optimal strategy*). Esse objetivo, em geral, não é trivial de ser atingido quando o ambiente é estocástico e apresenta resultados imprevisíveis. Em um ambiente com múltiplos agentes, todos tentando maximizar suas utilidades, a situação fica ainda mais complexa de ser analisada. Esses problemas recebem soluções conceito (*solution concepts*), as duas mais consagradas são o Ótimo de Pareto e o Equilíbrio de Nash.

Ótimo de Pareto ou Eficiência de Pareto é um perfil de estratégias no qual não há nenhum outro perfil que lhe seja Pareto Dominante. Isso quer dizer que um perfil estratégico Pareto Eficiente é aquele no qual não há como melhorar a utilidade de um jogador sem diminuir a utilidade de outro. A análise por Pareto considera o jogo como um todo. Uma das conclusões que se pode tirar é a de que existe ao menos um Ótimo de Pareto.

O Equilíbrio de Nash (NASH, 1950), ao contrário de Pareto, faz uma análise do ponto de vista do jogador. Ele é uma estratégia estável no qual nenhum agente deseja desviar sua

estratégia se eles soubessem quais estratégias os demais estão jogando, ou seja, cada jogador opta pela melhor resposta (*best response*) frente aos possíveis perfis estratégicos dos demais. A melhor resposta não é necessariamente única, alguns jogos podem resultar em estratégias puras, como é o caso do DP.

Definição de Equilíbrio de Nash: Segundo (OSBORNE; RUBINSTEIN, 1994) para um jogo na forma normal  $(N, A, u)$ , o Equilíbrio de Nash é o perfil de estratégias  $s = (s_1, \dots, s_n)$  se para todos os jogadores  $i \in N$  for válida a Equação (2).

$$u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}) \text{ para todos } a_i \in A_i \quad (2)$$

Onde  $s_i$  é a estratégia do jogador  $i$  e  $s_{-i}$  é perfil de estratégias sem esse jogador.

Há dois tipos de Equilíbrio de Nash, o Estritamente Nash e o Nash Fraco. O primeiro é aquele no qual a Equação (2) tem o sinal de maior, já o segundo, Nash fraco tem o sinal de maior ou igual. Ou seja, pode haver mais de um equilíbrio em um jogo finito, mas haverá sempre um ponto de equilíbrio (NASH, 1951).

A grande vantagem dos modelos de teoria dos jogos é na análise da concorrência imperfeita no mercado. Muito embora o mercado de energia elétrica apresente um produto (eletricidade) praticamente homogêneo, há barreiras de entrada para novos agentes comercializadores, limitação do número de agentes bem informados e capazes de ofertar preço, fazendo assim com que a definição de estratégias procure maximizar a utilidade de cada jogador em um jogo do tipo dilema do prisioneiro.

As interações entre os agentes, sejam elas cooperativas ou competitivas, ficam bem representadas na TJ. No entanto, a análise de estratégias ao longo do tempo é demasiado complexa uma vez que essa metodologia foi desenvolvida para tratar de conflitos na forma estática, discretos no tempo. Os modelos de TJ para jogos repetidos e finitos em geral levam a utilização de máquinas de estados finitos, ou máquinas de Moore, para a representação de estratégias além de *softwares* avançados de simulação. No entanto é possível adaptar um programa de computador dedicado a Dinâmica de Sistemas para resolver jogos repetidos.

## 2.6 DINÂMICA DE SISTEMAS

Os conceitos de teoria de sistemas e engenharia de controle foram apropriados por Jay W. Forrester no desenvolvimento da Dinâmica de Sistemas (DS). Essa técnica de modelagem, simulação e análise permite tratar de problemas econômicos e sociais de grande complexidade.

A DS permite, em um mesmo modelo, tratar de variáveis de longo e curto prazo, relações não-lineares, variáveis que não tem dimensões físicas, como a atratividade de um

produto, por exemplo. Além disso, sua principal característica é representar relações causais realimentadas entre as variáveis do modelo, o que confere dinâmica ao sistema sob investigação.

O equacionamento dos modelos de dinâmica de sistemas é semelhante com aqueles apresentados em sistemas de controle, o modelo DS pode ser representado por uma série de equações diferenciais formando um sistema. A solução algébrica, no entanto, é de elevada complexidade uma vez que normalmente há não linearidade em algumas das variáveis. As variáveis em DS podem ser de três classes:

Variável de Nível (ou Estado): representa a condição do sistema no tempo. São as variáveis de acumulação, ou seja, a diferença entre as taxas de entrada e as de saída. Matematicamente são representadas através da integral dos fluxos.

Variável de Taxa: responsável por controlar o fluxo nas variáveis de nível. De forma prática, conforme explica Bordin (2000), são responsáveis pela tomada de ação, recebendo informação do sistema para determinar a taxa de aumento ou decréscimo de outra variável.

Variável Auxiliar: o papel dessas variáveis é simplificar o modelo, explicitando todos os fatores que influenciam as demais variáveis do modelo.

O principal objetivo de um modelo DS é, a partir de um modelo mental, obter um modelo matemático que estabeleça as relações causais entre as variáveis. Para isso é preciso definir as estruturas a seguir:

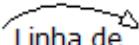
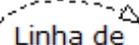
Linhas de Fluxo: indicam quais variáveis estão relacionadas. Podem ser do tipo conservativo, representando fluxo de informações com caráter físico como, por exemplo, número de contratos de energia ou demanda contratada. Já os fluxos não conservativos tratam de informações, como taxas de migração para o mercado livre, taxa de atratividade, entre outros.

Fontes ou Sumidouros: quando a origem ou o destino de um fluxo físico está fora do escopo do problema, ele é representado por essa estrutura. No presente trabalho, o símbolo utilizado para isso é de uma nuvem.

O Quadro 4 resume as principais estruturas de DS utilizadas neste trabalho. Embora haja uma certa uniformidade, ainda não há uma padronização, cada *software* de Dinâmica de Sistemas possui seu próprio conjunto de símbolos.

Quadro 4 - Símbolos do Software Powersim Studio versão 10.

Símbolo e Nome	Descrição
----------------	-----------

 Nível	Variável de acumulação influenciada pelos fluxos.
 Taxa	Variável que regula o valor das variáveis de nível.
 Auxiliar	Variável que realiza cálculos intermediários, clarificando a estrutura do modelo.
 Constante	Explicita valores constantes relevantes do modelo.
 Vetores	As bordas duplas indicam que a variável é um vetor em $R^n \forall n \geq 2$ .
 Linha de Informação	Determina relações entre variáveis indicando dependência.
 Linha de Inicialização	O tracejado na Linha de Informação mostra que a ligação informa o valor inicial ( <i>start-up</i> ) da variável.
 Fonte ou Sumidouro	Quando a origem do fluxo ou o seu destino final está fora dos limites do modelo, utiliza-se esta estrutura.

Fonte: Autor.

A grande vantagem da utilização da DS é que essa técnica permite modelar a competição imperfeita e gerar cenários de uma forma mais rápida do que os métodos analíticos de Teoria dos Jogos. Além disso é possível agregar os principais fluxos de informação, capital e investimentos que formam empresas de comercialização. O estado dessas variáveis é que definirá as estratégias adotadas por essas empresas para atingir seus objetivos de PdM.

Segundo Ford (1999), o processo de modelagem através da técnica de análise e modelagem de Dinâmica de Sistemas, segue oito etapas:

1. Aquisição de conhecimento sobre o sistema: O objetivo desta etapa é se familiarizar com o sistema, adquirir todo o conhecimento possível a seu

respeito, identificando as variáveis mais importantes que possivelmente expliquem seu comportamento dinâmico. Cabe ressaltar que, como todo o modelo é apenas uma representação da realidade, não é possível representar todas as variáveis de um sistema.

2. Especificação do comportamento dinâmico: Após o detalhamento do sistema na etapa anterior, cabe ao projetista determinar se o sistema tem um comportamento dinâmico. Em caso afirmativo, será possível desenhar um gráfico da evolução temporal da variável principal do modelo, conhecido como “modo de referência”
3. Construção de um diagrama de estoque e fluxo: A sugestão dos principais autores da área de DS é iniciar construção do modelo definindo inicialmente as variáveis de estoque, adicionar seus fluxos seguidos de algumas variáveis e constantes principais, sempre atentando para a consistência dimensional.
4. Construção do diagrama de laço causal: O propósito deste diagrama é representar as relações causais entre as variáveis. Quando elas forem complexas, é conveniente abrir o laço e colocar variáveis intermediárias. Isso auxilia no entendimento e na depuração do modelo.
5. Estimação de valores dos parâmetros: Nesta etapa cabe salientar que todos os parâmetros considerados essenciais para o problema devem ser representados. Sendo assim, mesmo que não haja, no decorrer do desenvolvimento do projeto, fontes que embasem uma estimativa de valor, cabe ao projetista determinar um valor coerente. Deve-se utilizar as melhores informações disponíveis para esses dados, sejam eles advindos de entrevistas, banco de dados ou relatórios.
6. Simulação do modelo: O objetivo da etapa de simulação é verificar a consistência do modelo, ou seja, se ele se comporta conforme previsto no modo de referência. Se isso se confirmar então a hipótese dinâmica adotada está correta.
7. Análise de sensibilidade: O objetivo desta etapa é verificar a robustez do modelo, ou seja, se os resultados são sensíveis a perturbações nos parâmetros incertos.
8. Aplicação do teste de políticas: A última etapa destina-se a avaliar a resposta do sistema a alterações nas variáveis políticas, ou seja, aquelas controladas pelo projetista.

Cabe ressaltar que, ao chegar a etapa oito o processo a modelagem do problema pode não estar concluída. Se alguma das etapas apresentar um resultado não satisfatório, cabe ao projetista retornar às etapas anteriores.

O Quadro 5 resume as principais características das técnicas estudadas na solução do problema de divisão de mercado, contemplando os pontos fortes e fracos de cada uma. Uma vez que o problema apresenta diversas variáveis de influência, requerendo uma modelagem que vai além das empresas e contempla o mercado de energia, a técnica adotada foi a combinação da Dinâmica de Sistemas para tratar da estrutura e a Teoria dos Jogos para lidar com os conflitos e possíveis guerras de preço.

Quadro 5 - Técnicas de Modelagem para Divisão de Mercado.

<b>Técnica de Modelagem</b>	<b>Principais Características</b>
Teoria dos Jogos (TJ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica conceitualmente mais adequada para competição imperfeita;</li> <li>• Alta complexidade para tratar de múltiplos agentes e jogos repetidos;</li> <li>• Dificuldade de representar fatores de decisão fora do controle dos jogadores.</li> </ul>
Dinâmica de Sistemas (DS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade em representar comportamentos estratégicos;</li> <li>• Capaz de representar laços de realimentação;</li> <li>• Permite modelar aspectos técnicos, econômicos e estratégicos em uma mesma estrutura;</li> <li>• Aplicação já conceituada no planejamento de diversos setores da indústria, inclusive o da energia;</li> <li>• Facilidade na análise de cenários de longo prazo.</li> </ul>

Fonte: adaptado de BORDIN (2000).

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

É importante destacar que o setor elétrico brasileiro está em constante evolução. O planejamento estratégico das empresas do setor elétrico responsáveis pelo fornecimento de energia, seja ele físico ou contratual, tem como variável crítica no seu modelo de negócios a demanda. As distribuidoras, que antes tinham previsibilidade sobre a demanda, passaram a operar com incertezas, principalmente no segmento de consumidores industriais que passaram a migrar para o mercado livre. Essa característica faz com que os modelos para análise de

mercado devam ser flexíveis, permitindo que as mudanças na política energética influenciem de maneira realista os agentes de mercado.

O número de consumidores livres e especiais aumentou consistentemente ao longo do tempo e a demanda das empresas comercializadoras seguiu a mesma tendência. Desta forma o setor tornou-se atrativo, motivando aquisições, fusões e entrada de novas empresas no setor. Em um cenário no qual a conjuntura de mercado sofre mudanças repetidamente existe a necessidade de desenvolver ferramentas para a tomada de decisão que contemple a concorrência, por isso a importância de desenvolver um modelo de mercado que teste as estratégias das empresas.

O desafio de desenvolver um modelo que agregue todas as características mencionadas nesta seção e que acompanhe o desenvolvimento o setor é complexo. Não existe nenhum modelo que replique de maneira perfeita a realidade, entretanto é possível selecionar um conjunto de variáveis e indicadores capazes de gerar uma previsão razoável da situação, mesmo em um ambiente altamente competitivo e com informações incompletas.

Neste contexto de mercado competitivo, os modelos mais eficazes para a projeção de demanda são importantíssimos para o suporte na tomada de decisão, auxiliando na aprendizagem organizacional e facilitando a definição de estratégias.

### 3 MODELOS PARA ANÁLISE DE MERCADO

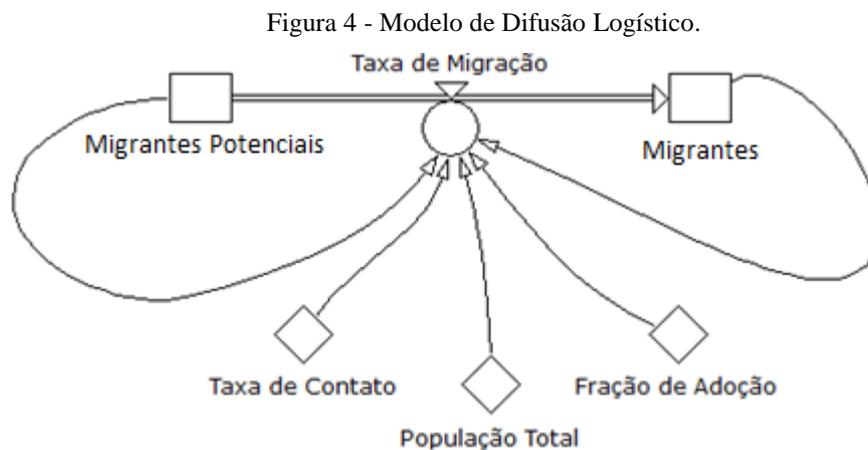
#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo discute alguns modelos para análise de mercado, que atendem parcialmente as necessidades deste projeto, descreve as principais premissas adotadas no modelo proposto. É também descrita a integração implementada do algoritmo de Teoria dos Jogos no *software* de Dinâmica de Sistemas para a determinação do equilíbrio de mercado.

#### 3.2 O MODELO DE DIFUSÃO

Quando o *Compact Disk* (abreviado de CD) entrou no mercado no início de 1982, não houve uma migração massiva para a nova mídia. Ninguém descartou suas fitas magnéticas e correu até as lojas para adquirir a novidade. Existe um período de transição no qual um novo produto se consolida em um mercado e, geralmente, é substituído por alguma nova tecnologia ao final do seu ciclo de vida.

Algumas décadas antes do surgimento dos CDs alguns modelos de Dinâmica de Sistemas já descreviam o comportamento das vendas ou adoção de novos produtos e tecnologias. Estes modelos se baseavam no fato de que a difusão de um produto no mercado se comportava como uma clássica curva em forma de “S”, típica de uma curva de crescimento logístico. A Figura 4 representa um modelo logístico simplificado, utilizando a convenção de símbolos descritos no Quadro 4.



Fonte: Autor.

Neste modelo a constante “População Total” representa todos aqueles capazes de adquirir um determinado produtos ou serviço que seja o objeto do modelo além daqueles que

já o adquiriram. A “Fração de Adoção” representa a proporção do número de contatos que são necessários para motivar a migração. A “Taxa de Contato” é a frequência com a qual “Migrantes” e “Migrantes Potenciais” se encontram em um determinado intervalo de tempo. As Equações (3) a (5) que regem o modelo são:

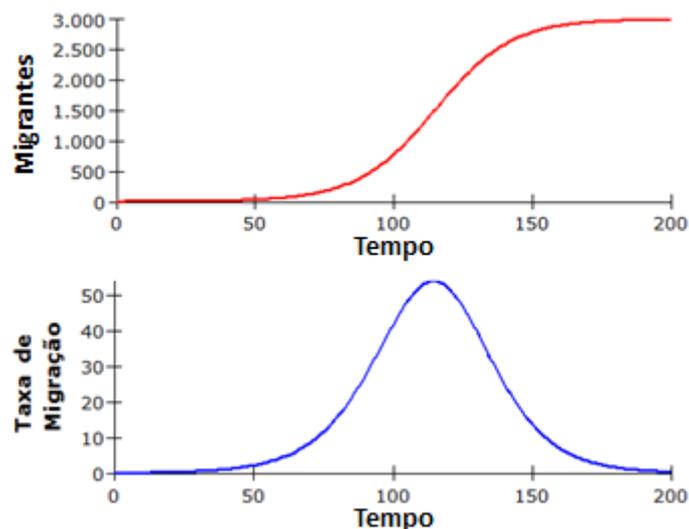
$$\text{Migrantes} = \int_{t_0}^t \text{Taxa de Migração} dt + M_0 \quad (3)$$

$$\text{Migrantes Potenciais} = \int_{t_0}^t -\text{Taxa de Migração} dt + \text{Pop. Total} - M_0 \quad (4)$$

$$\text{Taxa de Migração} = T. \text{Contato} \times F. \text{Adoção} \times \text{Migrantes Pot.} \times \frac{\text{Migrantes}}{\text{População Total}} \quad (5)$$

Onde  $M_0$  é o número inicial de migrantes e a variável  $t$  representa o período de tempo. O modelo funciona para qualquer  $M_0 > 0$ . A Figura 5 apresenta o resultado de uma simulação quando  $M_0$  é igual a um, “Taxa de Contato” é de 0,36, “Taxa de Adoção” é igual a 0,2 e a “População Total” é igual a 3000.

Figura 5 - Gráfico de Difusão do Modelo Logístico



Fonte: Autor.

Os modelos de crescimento logístico, no entanto, não representam adequadamente o processo de adoção de novas tecnologias ou serviços uma vez que se o número inicial de migrados,  $M_0$ , for igual a zero a “Taxa de Migração” fica permanentemente em zero. Em outras palavras, zero é um ponto de equilíbrio e o modelo não é capaz de explicar a origem do processo de migração.

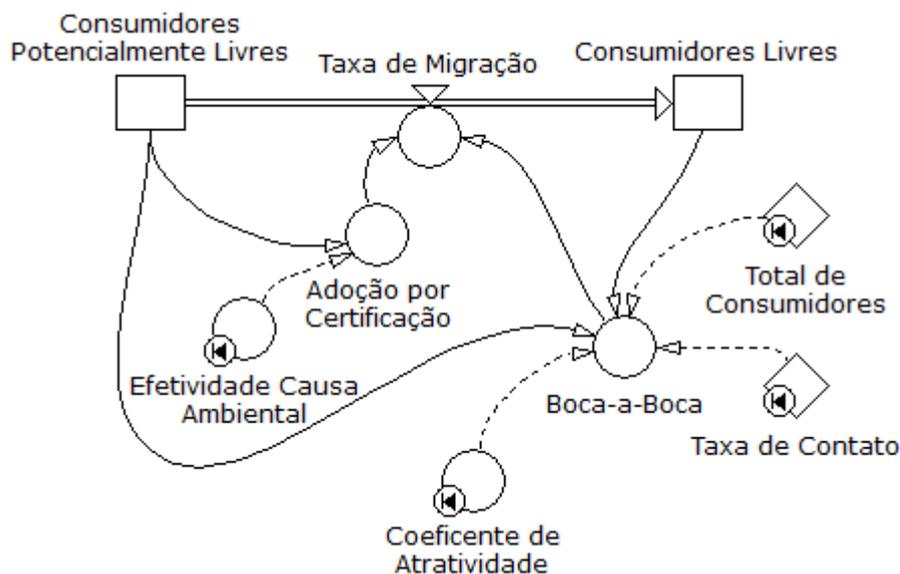
A solução para o problema de inicialização do modelo de difusão logístico foi apresentada por Frank Bass (BASS, 1969) no final da década de 60. Seu modelo apresentava uma simples alteração do modelo logístico exposto neste capítulo, ele acrescentou um laço de

balanceamento entre os “Potenciais Migrantes” e a “Taxa de Migração”. A Figura 6 representa um modelo de difusão de Bass aplicado a entrada de consumidores no ACL.

Neste modelo, a “Taxa de Migração” é o resultado da soma de duas variáveis, “Boca-a-boca” e “Adoção por Certificação”. Inicialmente não há nenhum consumidor no mercado livre para entrar em contato com os consumidores potencialmente livres e incentivar a migração. Há, no entanto, motivação para se obter certificados de uso de fontes de energia limpa. Desta forma o modelo funciona mesmo com o número inicial de consumidores igual a zero.

A equação que define a variável auxiliar “Boca-a-boca” é análoga a Equação (5) que descreve a “Taxa de Migração” do modelo logístico. A “Adoção por Certificação” é o produto entre os “Consumidores Potencialmente Livres” e a “Efetividade Causa Ambiental”.

Figura 6 - Modelo de Difusão de Bass.



Fonte: Autor.

Os dados de 2004 a 2016, com a posição final de junho do último ano, do número de consumidores no ACL fornecidos pelo especialista Daniel Serpa do Grupo CDI Comunicação e Marketing, empresa terceirizada à serviço da CCEE, foram comparados com a saída do modelo, através da Figura 7. O resultado do modelo foi obtido quando a variável “Total de Consumidores” foi igual a três mil, a “Taxa de Contato” igual a 0,55, o “Coeficiente de Atratividade” igual a 0,85 e a “Efetividade Causa Ambiental” foi de 0,05.

Figura 7 - Gráfico de Saída do Modelo de Bass Aplicado a Migração para o ACL.

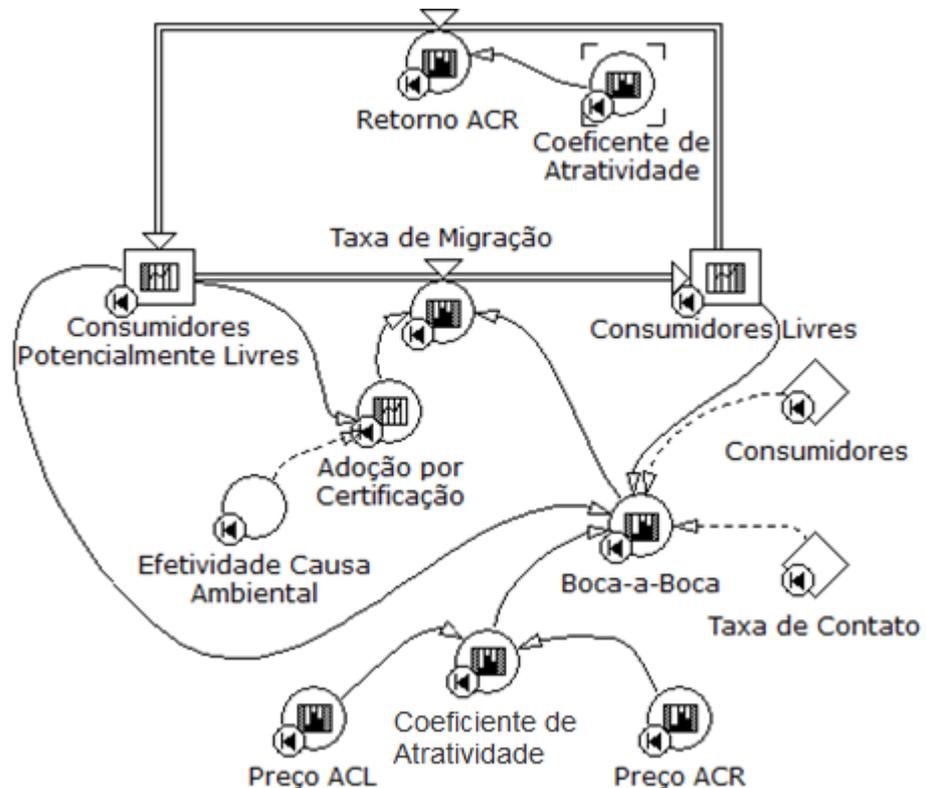


Fonte: Autor.

A limitação do modelo de Bass é não considerar o ciclo de reposição ou descarte do produto. Não há um fluxo de retorno ao nível inicial, ou seja, depois de migrar para o ACL o modelo não possibilita ao consumidor retornar ao mercado cativo, outro problema é o fato de considerar o tamanho do mercado constante.

O modelo final de migração para o mercado livre considera que a atratividade do mercado é variável no tempo e depende da relação entre os preços praticados no ACL e no ACR. A variável “Preço ACL” é uma série composta pela média anual do preço do PLD em todos os submercados (CCEE, 2016a) e o “Preço ACR” é uma série composta pela média anual das tarifas industriais de energia elétrica no Brasil, ponderadas por volume (ANEEL, 2016). Este modelo é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Modelo de Migração de Consumidores para o ACL.



Fonte: Autor.

As equações que regem o comportamento do modelo e os valores das constantes são similares aquelas descritas no modelo de Bass, salvo as variáveis expressas pelas Equações (6), (7), (8) e (9).

$$\text{Boca-a-Boca} = \frac{\text{taxa de contato} \times \text{Coef.de Atratividade} \times \text{C.Livres} \times \text{C.Potencialmente Livres}}{\text{Consumidores}} \quad (6)$$

$$\text{Coef. de Atratividade} = \left(1 - \frac{\text{Preço ACL}}{\text{Preço ACR}}\right) \times 0,90 \quad (7)$$

$$\text{Retorno ACR} = \begin{cases} 0, & \text{se Coef. de Atratividade} < 0 \\ |1 - \text{Coef. de Atratividade}|, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Taxa de Contato} = 0,35 \quad (9)$$

O modelo final de migração de consumidores é capaz de capturar a motivação econômica no processo de adesão ao ACL, demonstrando a expansão e retração do mercado em função do preço da energia. Embora o modelo seja adequado para capturar tendências de mercado, dado a sua natureza de primeira ordem ele é incapaz de gerar respostas impulsivas. Além disso, observa-se na Figura 9 há um crescimento lento nos anos de 2005 a 2007 do número de consumidores no ACL, seguido de uma diminuição no ano seguinte. O modelo não retrata adequadamente esse cenário, pois não estão incluídos nele fatores como o Produto Interno Bruto brasileiro, barreiras de entrada para o ACL e limites de capacidade de migração.

Figura 9 - Saída do Modelo Final Aplicado a Migração para o ACL;



Fonte: Autor.

### 3.3 O MODELO DE COURNOT

O modelo desenvolvido por Augustin Cournot em 1838, diferentemente dos modelos anteriores que tratam da migração de um serviço, tem por objetivo explicar como empresas, variando do duopólio a competição perfeita, formam a sua produção (oferta de energia) a fim de maximizar seus lucros. Cournot assume que os produtos são idênticos e todas as ofertas são apresentadas ao mercado simultaneamente.

Ao se adaptar o modelo de Cournot para o mercado de energia elétrica é preciso aceitar sua premissa de que o preço de mercado por unidade,  $P$  ( $R\$/MWh$ ), é uma função decrescente da oferta total de energia no mercado,  $Q_T$ . Define-se, então, a oferta total do mercado através da Equação (10). A base conceitual e formulação deste problema foi retirada de Bordin (BORDIN, 2000) e o exemplo foi parcialmente adaptado de Biermann (BIERMAN; FERNANDEZ, 1998).

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (10)$$

Onde  $Q_i$  é a oferta de energia, em MWh, ofertada pela empresa  $i$ . Supõe-se que o preço da energia no mercado spot é dado pela Equação (11) e que há somente duas empresas, a Comercializadora A e a Comercializadora B qualificadas para ofertar neste mercado.

$$P = \begin{cases} 200 - 2Q_T, & \text{se } 0 \leq Q_T \leq 100 \\ 0, & \text{se } Q_T > 100 \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

$$Q_T = Q_A + Q_B \text{ (MWh).}$$

Assumindo que as empresas possuem a mesma estrutura e seus custos fixos são idênticos, ou seja, não alteram o ponto de decisão, somente seus custos variáveis são relevantes para a análise. Os custos variáveis são dados pela Equação (12).

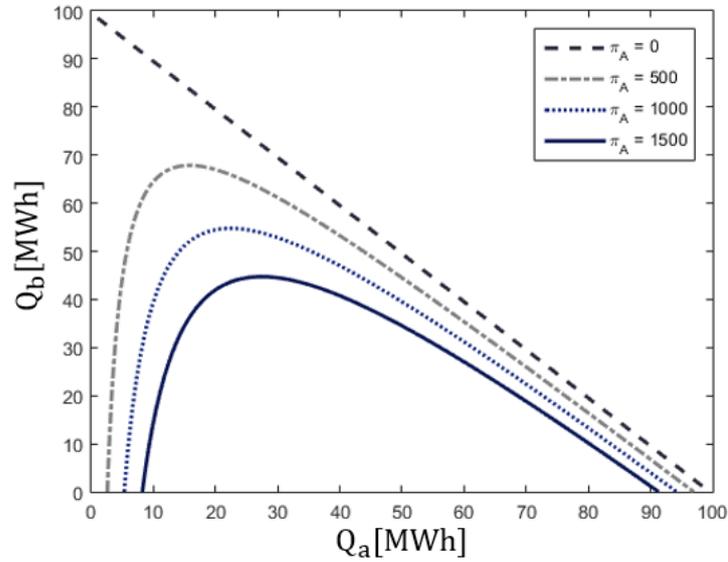
$$TC_i = \alpha_i Q_i \quad \text{para } i = A, B \quad (12)$$

O parâmetro  $\alpha_i$  representa o custo de venda (contatos, elaboração de documentos, representação) envolvendo a venda de cada unidade de energia, ele tem a dimensão de  $R\$/MWh$ . Sendo assim é possível expressar o lucro de cada comercializadora em função da oferta de energia disponível no mercado. O lucro de cada empresa é expresso pela Equação (13).

$$\pi_i(Q_A, Q_B) = (200 - 2(Q_A + Q_B)) \times Q_i - \alpha_i Q_i \quad \text{para } i = A, B \quad (13)$$

Fixando o lucro da Comercializadora A e fazendo  $\alpha_A = 1$  ( $R\$/MWh$ ) é possível traçar curvas *isoprofit* da Figura 10. É possível também interpretar o modelo de Cournot como um jogo no qual as estratégias puras das Comercializadoras A e B consistem em ofertar valores positivos de energia e a sua utilidade é o lucro obtido com a venda de seus respectivos montantes.

Figura 10 - Curvas Isoprofit da Comercializadora A ( $\alpha_A = 1$ ).



Fonte: Autor.

Se a Comercializadora A soubesse de antemão quando a concorrente irá ofertar bastaria a ela procurar a curva *isoprofit* tangente a reta horizontal que representa essa oferta. Como a função de lucro da Equação (13) é quadrática, é possível determinar seu mínimo global através da Equação (14).

$$\frac{\partial \pi_A}{\partial Q_A}(Q_A, Q_B) = 200 - \alpha_A - 2Q_B - 4Q_A = 0 \quad (14)$$

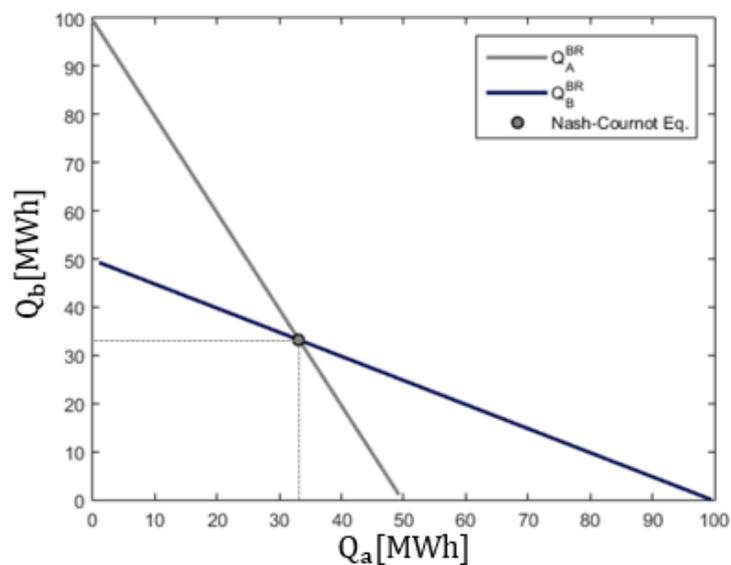
Utiliza-se isso para determinar a função de melhor resposta da Comercializadora A, dada pela Equação (15). De maneira análoga determina-se a função de melhor resposta de B.

$$Q_A^{BR}(Q_B) = 50 - 0,25\alpha_A - 0,5Q_B \quad (15)$$

$$Q_B^{BR}(Q_A) = 50 - 0,25\alpha_B - 0,5Q_A \quad (16)$$

Como a função de lucro é simétrica, as funções de melhor resposta também o são. Como definido na Seção 2.5, o equilíbrio de Cournot-Nash é o ponto no qual os dois jogadores adotam sua melhor resposta, ou seja, o ponto em que as funções de melhor resposta,  $Q_A^{BR}$  e  $Q_B^{BR}$  se cruzam como ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Equilíbrio do Modelo de Cournot ( $\alpha_A = \alpha_B = 1$ ).



Fonte: Autor.

O modelo de Cournot não é suficiente para expressar as relações existentes no mercado livre de energia uma vez que uma de suas premissas é a de que o preço de mercado é determinado pela oferta total das geradoras e comercializadoras. Além disso, nenhuma firma controla diretamente o preço de mercado, o que é fato para o mercado livre de energia, no entanto, no modelo as empresas recebem o preço de mercado. Isso faz com que o preço não seja um variável estratégica para Cournot (BIERMAN; FERNANDEZ, 1998). Embora este modelo seja útil na precificação de *commodities* agrícolas, no ACL as empresas ofertam preço e demanda.

### 3.4 O MODELO DE BERTRAND

O modelo de Joseph Bertrand foi desenvolvido a fim de solucionar as críticas sofridas pelo modelo de Cournot. A principal delas é com relação ao preço. Neste modelo, ao contrário do anterior, cada empresa oferta seu produto definindo não apenas a quantidade, mas também o seu próprio preço, desconhecendo a oferta das demais empresas.

Seguindo com o exemplo da seção anterior, as Comercializadoras A e B desejam aumentar sua PdM definida pela demanda atendida. O CEO da Comercializadora A sabe que se oferecer um preço abaixo da concorrência sua demanda será maior. No entanto, só é possível oferecer energia até o limite do volume que foi contratado previamente com geradores. Essa restrição de volume de energia será colocada na matriz de custos de cada comercializadora



A partir da Equação (20) é possível deduzir a Equação (21) que expressa a demanda de B em função dos preços praticados pelas duas companhias.

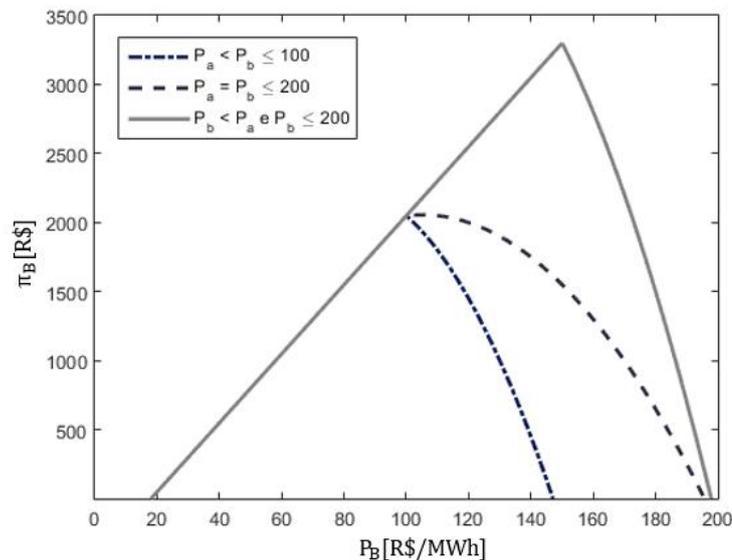
$$Q_B(P_A, P_B) = \begin{cases} \min\left\{75 - \frac{P_B}{2}, 25\right\}, & \text{se } P_A < P_B \leq \frac{R\$150}{MWh} \\ \min\left\{\frac{1}{2}\left(100 - \frac{P_B}{2}\right), 25\right\}, & \text{se } P_A = P_B \leq \frac{R\$200}{MWh} \\ \min\left\{100 - \frac{P_B}{2}, 25\right\}, & \text{se } P_B < P_A \leq \frac{R\$200}{MWh} \\ 0, & \text{em qualquer outro caso} \end{cases} \quad (20)$$

O lucro da empresa B é dado então pela Equação (20).

$$\pi_B(P_A, P_B) = \begin{cases} (P_B - \alpha_B) \min\left\{75 - \frac{P_B}{2}, 25\right\} - \beta_B, & \text{se } P_A < P_B \leq \frac{R\$150}{MWh} \\ (P_B - \alpha_B) \min\left\{\frac{1}{2}\left(100 - \frac{P_B}{2}\right), 25\right\} - \beta_B, & \text{se } P_A = P_B \leq \frac{R\$200}{MWh} \\ (P_B - \alpha_B) \min\left\{100 - \frac{P_B}{2}, 25\right\} - \beta_B, & \text{se } P_B < P_A \leq \frac{R\$200}{MWh} \\ 0, & \text{em qualquer outro caso} \end{cases} \quad (21)$$

Fazendo  $\alpha_B = \frac{R\$10}{MWh}$  e  $\beta_B = R\$200$ , é possível traçar o gráfico da Figura 13.

Figura 13 - Funções de Lucro para Diferentes Estratégias de Preço.



Fonte: Autor.

Conclui-se, a partir da Figura 13 que é possível dividir as estratégias de melhor resposta de B em relação aos preços ofertados por A em três intervalos em  $R\$/MWh$ , são eles:  $[18; 100]$ ,  $]100;150]$ ,  $[150;200]$ . A Comercializadora B pode corretamente inferir que sua concorrente não irá ofertar nenhum preço abaixo de  $R\$18/MWh$ , uma vez que estes preços resultariam em prejuízo financeiro. Se ela assumir, no entanto que a concorrente irá ofertar um

preço entre dezoito e cem reais por megawatt médio, sua melhor resposta é cotar sua energia a cem reais por megawatt médio pois a demanda de mercado supera a demanda máxima que pode ser fornecida pelas duas empresas conjuntamente.

Considerando o cenário no qual a empresa A cota sua energia entre um valor superior a cem reais o megawatt médio e inferior a cento e cinquenta, a melhor resposta de B é cotar a um preço menor do que a concorrência. O último intervalo estratégico de preço neste exemplo ocorre quando a empresa A pratica preços acima de cento e cinquenta reais. Para qualquer valor acima disso basta que a empresa B oferte sua energia a exato cento e cinquenta reais por megawatt médio, assim a demanda máxima de mercado será de 25MWh e será totalmente atendida por B. O Quadro 6 resume estas estratégias.

Quadro 6 - Funções de Melhor Resposta da Comercializadora B.

Preços de A ( $P_A$ )	Melhor Resposta de B ( $P_B^R$ )
$R\$18/MWh \leq P_A \leq R\$100/MWh$	$P_B^R = R\$100/MWh$
$R\$100/MWh < P_A \leq R\$150/MWh$	$P_B^R = P_A - \varepsilon$
$R\$150/MWh < P_A$	$P_B = R\$150/MWh$

Nota:  $\varepsilon$  é um valor positivo, arbitrariamente pequeno.

Fonte: Autor.

Pode-se, então, montar um jogo na forma normal no qual as cotações de preço são as ações dos jogadores e o lucro é a utilidade. Este jogo, representado no Quadro 7, tem como equilíbrio de Nash o ponto no qual ambas comercializadoras definem suas cotações em  $R\$100/MWh$ . Apesar de a estratégia pura de jogar o ponto de 100 reais por megawatt médio ser estritamente dominante, observa-se que se fossem restringidas ofertas abaixo de 125 reais por megawatt médio, o jogo que ocorreria nas quatro células do canto inferior direito seria do tipo Dilema dos Prisioneiros tratado na seção 2.5.

Quadro 7 - Jogo na forma Normal da Disputa de Mercado.

		Comercializadora A				
		50	75	100	125	175
Comercializadora B	50	800 , 800	800 , 1425	800 , 2050	800 , 1238	800 , 0
	75	1425 , 800	1425 , 1425	1425 , 2050	1425 , 1238	1425 , 0
	100	2050 , 800	2050 , 1425	2050 , 2050	2050 , 1238	2050 , 0
	125	1238 , 800	1238 , 1425	1238 , 2050	1956 , 1956	2675 , 0
	175	0 , 800	0 , 1425	0 , 2050	0 , 2675	831 , 831

Nota: as ações têm dimensões de  $R\$/MWh$  e as utilidades, de R\$.

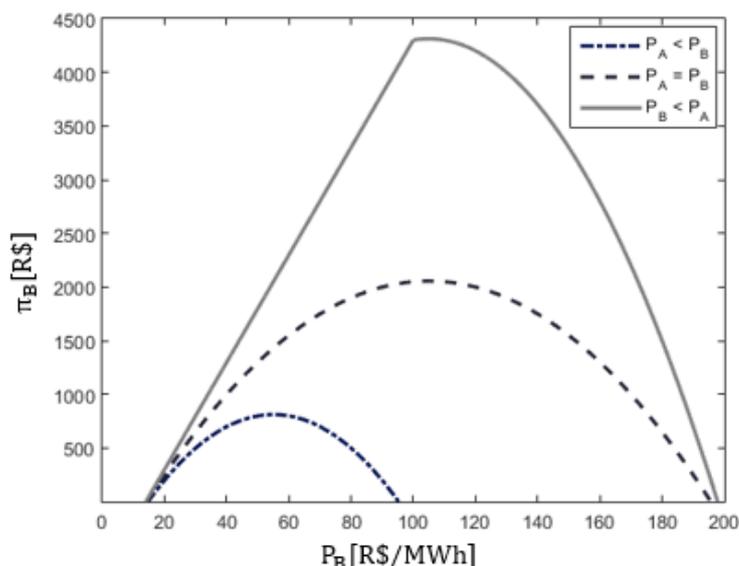
Fonte: Autor.

Uma situação interessante acontece quando a demanda das empresas é aumentada para 50MWh, *ceteris paribus*. Isso poderia ocorrer, por exemplo, quando as projeções de demanda

de mercado feitas pelas empresas sobrestimam a real demanda de mercado, fazendo com que elas adquiram um volume maior de energia.

Percebe-se a partir dos gráficos da Figura 14 que só há uma melhor resposta de B em relação a cotação adotada por A, adotar um preço menor que A. O que ocorre então é uma guerra de preços, na qual o preço tende ao custo marginal das empresas A e B.

Figura 14 - Funções de Lucro para Comercializadoras com Capacidade Elevada



Fonte: Autor.

Conclui-se, então, que a aplicação do modelo de Bertrand para a solução da disputa de PdM no ACL atende as premissas básicas de comportamento do mercado. Além disso, colocadas restrições de capacidade ou limites de preço, o jogo que determina a tomada de decisões se altera. Na próxima seção é abordado um algoritmo para o cálculo do ponto de equilíbrio de Nash para um jogo do tipo bimatricial  $m \times n$ , onde  $m$  e  $n \geq 2$ , possibilitando a solução deste modelo em diferentes cenários de preço, em um sistema dinâmico.

### 3.5 O ALGORITMO DE LEMKE-HOWSON

A determinação do ponto de equilíbrio de um jogo de soma zero com dois jogadores, ou seja, aquele no qual a utilidade esperada de um jogador é representada pela perda do outro jogador ( $U_A^* = -U_B^*$ ) pode ser feita através de programação linear. Isso significa que podem ser resolvidos em tempo polinomial, isto é, contanto o número de operações elementares realizadas, onde cada uma delas tem um tempo fixo de execução, no pior caso o algoritmo

chega ao resultado em um tempo da ordem de  $O(n^k)$ , onde  $n$  é o comprimento do vetor de entrada e  $k$  é um inteiro.

A incerteza envolvendo os limites de capacidade e cada empresa somado a possíveis restrições de preços, representadas no modelo através de políticas, faz com que seja necessário um método de solução que contemple qualquer tipo de jogo entre dois jogadores. Encontrar o equilíbrio de Nash para qualquer jogo nessas circunstâncias é um problema linear complementar (LCP). O LCP é um problema de satisfação das restrições, ou *feasibility problem*, e não um problema de otimização (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008).

A formulação do LCP aplicado à teoria dos jogos, conforme Leyton-Brown e Shoham (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2008) é dada pelas Equações (22) a (27).

$$\sum_{k \in A_B} u_A(a_A^j, a_B^k) \cdot s_B^k + r_A^j = U_A^* \quad \forall j \in A_A \quad (22)$$

$$\sum_{k \in A_A} u_B(a_A^j, a_B^k) \cdot s_A^j + r_B^k = U_B^* \quad \forall k \in A_B \quad (23)$$

$$\sum_{j \in A_A} s_A^j = 1, \quad \sum_{k \in A_B} s_B^k = 1 \quad (24)$$

$$s_A^j \geq 0, \quad s_B^k \geq 0 \quad \forall j \in A_A, \forall k \in A_B \quad (25)$$

$$r_A^j \geq 0, \quad r_B^k \geq 0 \quad \forall j \in A_A, \forall k \in A_B \quad (26)$$

$$r_A^j \cdot s_A^j = 0, \quad r_B^k \cdot s_B^k = 0 \quad \forall j \in A_A, \forall k \in A_B \quad (27)$$

As Equações (22) e (23) definem as utilidades esperadas para cada jogador contemplando todas as ações possíveis no espaço de ações de cada jogador, conforme definido na Equação (1). As Equações (24) e (25) impõe aos vetores de probabilidade que a soma dos seus elementos seja um e que eles não contenham valores negativos. As variáveis  $r_A$  e  $r_B$  são do tipo slack e a condição não linear imposta pela Equação (26), chamada também de condição complementar, é a que torna possível a solução deste problema.

O algoritmo mais conhecido para a solução deste problema foi proposto por Carlton E. Lemke e Joseph T. Howson em 1964. O método proposto por eles é de representar o conjunto de melhor resposta de cada jogador através de um politopo, ou seja, uma figura em que todas as faces são planas. Cada vértice da figura representa uma estratégia pura e pontos nas arestas, estratégias mistas. O ponto de equilíbrio de Nash é encontrado definindo índices para cada vértice e relacionando os dois politopos até encontrar vértices com os mesmos índices (LEMKE; HOWSON, 1964).

Adotando a notação adotada por Pritchard (2011) considera-se que o jogador A possui “m” ações indexadas em  $M = \{1, \dots, m\}$  e o jogador B tem “n” ações indexadas em  $N = \{m, \dots, m + n\}$ . A matriz C representa as utilidades do jogador A enquanto a matriz D, as do jogador B. Se o jogador A escolhe as linhas, então o vetor de estratégia mista de A é do tipo linha com “m” elementos e, como B escolhe as colunas, seu vetor é do tipo coluna com “n” elementos. Estes vetores obedecem às Equações (25) e (26).

Com esta notação a utilidade esperada para o jogador A quando o perfil estratégico  $(x^T, y)$  é jogado é de  $x^T C y$  e, para o jogador B,  $x^T D y$ . Sendo assim, pode-se definir os politopos  $P_A$  e  $P_B$  através das Equações (27) e (28).

$$P_A = \{x \in \mathbb{R}^M | (\forall i \in M: x_i \geq 0) \& (\forall j \in N: x^T D_j \leq 1)\} \quad (27)$$

$$P_B = \{y \in \mathbb{R}^N | (\forall j \in N: y_j \geq 0) \& (\forall i \in M: C^i y \leq 1)\} \quad (28)$$

O sistema de indexação segue a lógica de que sendo  $x \in P_A$  ele tem um índice “k”, onde  $k \in M \cup N$ , se  $k \in M$  e  $x_k = 0$  ou se  $k \in N$  e  $x^T D_k = 1$ . A indexação de  $y$  é análoga. O algoritmo pode ser descrito pelo pseudocódigo do Quadro 8, onde  $norm(x)$  é a normalização do vetor  $x$  conforme a Equação (29).

$$norm(x) = \frac{x}{\sum_i x_i} \quad (29)$$

Quadro 8 - Pseudocódigo do Algoritmo de Lemke-Howson.

- 1: Inicializar os vetores  $x$  e  $y$  com todos os elementos iguais a zero e dimensões  $m$  e  $n$ , respec.
- 2: Os índices de  $x$  são  $\{1, \dots, m\}$  e os de  $y$  são  $\{m, \dots, m + n\}$
- 3: Sendo  $k_0$  qualquer índice de  $x$  (índice inicial para percorrer o politopo  $P_A$ )
- 4:  $k := k_0$
- 5: Entra no laço
- 6: Em  $P_A$ , remove o índice  $k$  de  $x$ ; redefine  $x$  como novo vértice e  $k$  o índice adicionado
- 7: Se  $k = k_0$ , sai do laço
- 8: Em  $P_B$ , remove o índice  $k$  de  $y$ ; redefine  $y$  como novo vértice e  $k$  o índice adicionado
- 9: Se  $k = k_0$ , sai do laço
- 10: Saída (  $norm(x), norm(y)$  )

Fonte: adaptado de (PRITCHARD, 2011).

É possível aplicar o algoritmo na solução do equilíbrio de mercado entre duas comercializadoras A e B operando com um portfólio de energia contratado de 50MWmed, como exposto na Figura 14. Considerando que cada empresa possui apenas duas opções de precificação,  $R\$50/MWmed$  ou  $R\$100/MWmed$ . A matriz de lucros das empresas pode ser vista como um jogo, como mostra o Quadro 9.

Quadro 9 - Jogo na Forma Normal Exemplificando Lemke-Howson.

		Comercializadora A	
		50	100
Comercializadora B	50	1300 , 1300	1800 , 0
	100	0 , 1800	2050 , 2050

Fonte: Autor.

Conforme definido anteriormente, as matrizes de *payoff* C e D são:

$$C = \begin{bmatrix} 1300 & 1800 \\ 0 & 2050 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1300 & 0 \\ 1800 & 2050 \end{bmatrix}$$

Reformulam-se as equações (22) e (23) fazendo  $\bar{r}_A = \mathbf{1} - C\bar{y}$  e  $\bar{r}_B = \mathbf{1} - D^T\bar{x}$ .

$$r_A^1 = 1 - 1300y_3 - 1800y_4 \quad (30)$$

$$r_A^2 = 1 - 0y_3 - 2500y_4 \quad (31)$$

$$r_B^3 = 1 - 1300x_1 - 1800x_2 \quad (32)$$

$$r_B^4 = 1 - 0x_1 - 2050x_2 \quad (33)$$

Para a primeira iteração, escolhe-se arbitrariamente  $k_0 = 1$ , ou seja, isola-se  $x_1$  na Equação (31). Caso o coeficiente de  $x_1$  na Equação (33) fosse diferente de zero seria necessário utilizar o critério de razão mínima para definir a função a ser alterada. Este critério considera que a melhor escolha é aquela que minimiza a razão entre a variável de slack e o coeficiente de  $x_1$ , neste caso. Sendo assim, o sistema de equações tem a seguinte forma:

$$x_1 = \frac{1}{1300} - \frac{1800}{1300}x_2 - \frac{r_B^3}{1300} \quad (34)$$

A próxima variável a entrar na base é  $y_3$ , pois possui o mesmo índice de  $r_B^3$ . Da mesma forma que no caso anterior, utiliza-se o critério da razão mínima, selecionando-se a Equação (29) para isolar o  $y_3$ .

$$y_3 = \frac{1}{1300} - \frac{1800}{1300}y_4 - \frac{r_A^1}{1300} \quad (35)$$

Seguindo o algoritmo, a próxima variável a entrar na base seria  $x_1$ , no entanto, ela já está na base. Desta forma o algoritmo termina, pois  $k = k_0 = 1$ . Observa-se que  $x_2$  e  $y_4$  não entraram na base, há portanto mais de um equilíbrio de Nash neste jogo. Assim o primeiro equilíbrio deste jogo ocorre quando as variáveis  $r_B^3$ ,  $r_A^1$ ,  $x_2$  e  $y_4$  forem zero resultando em  $\bar{x} = [1 \ 0]$  e  $\bar{y} = [1 \ 0]$ , ou seja, R\$1300 de lucro para cada empresa. Outro possível equilíbrio é fazer  $x_1$  e  $y_3$  juntamente com as variáveis de slack iguais a zero. Isso resulta em  $\bar{x} = [0 \ 1]$  e  $\bar{y} = [0 \ 1]$ , ou seja, R\$2050 de lucro. Por último ainda há um ponto de estratégia mista, quando

somente o slack é zero,  $\vec{x} = [5/31 \quad 26/31]$  e  $\vec{y} = [5/31 \quad 26/31]$ , gerando aproximadamente R\$1720 de lucro.

A fim de implementar o algoritmo dentro do software de dinâmica de sistemas, o Powersim Studio versão 10, foi desenvolvido uma biblioteca de link dinâmico (dll) com uma função programada em linguagem C++ que excuta o algoritmo de Lemke-Howson com algumas modificações. A modificação mais relevante é na etapa de pré-processamento, antes de iniciar o algoritmo em si. Nesta etapa são eliminadas estratégias estritamente dominadas, reduzindo o tempo de processamento. O *software* Powersim Studio chama essa biblioteca externa e é capaz de executar a função NASH (M1,M2) definida por ela, onde M1 é a matriz de *payoff* da empresa A e M2, da B, como se fosse uma função nativa do programa.

## 4 MODELO PROPOSTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve as principais premissas do modelo de mercado. As demais seções do capítulo objetivam orientar e apresentar ao leitor a metodologia empregada na análise, modelagem e simulação do modelo proposto.

### 4.2 PREMISSAS

Aqui são apresentadas algumas das principais proposições que fundamentaram a análise do mercado livre de energia elétrica e a construção do modelo proposto. A primeira delas, e possivelmente a mais importante, é a da racionalidade. Embora as limitações do conceito de racionalidade perfeita sejam muito discutidas, neste trabalho parte-se do princípio de que tanto os consumidores quanto os demais agentes do mercado são racionais. Isso quer dizer que eles fazem suas escolhas no intuito de maximizar suas utilidades. Essa premissa é válida uma vez que os produtos são homogêneos e perfeitamente substituíveis.

Outra premissa importante é que não há fluxo de informações privilegiadas, ou seja, o mercado é honesto. Esse conceito garante duas características importantes ao modelo, a primeira é a de que os competidores devem se posicionar buscando maximizar sua utilidade no pior cenário (equilíbrio de Nash), a outra é a de que as cotações oferecidas pelas comercializadoras são independentes da demanda do consumidor, tratando todos eles da mesma forma.

Presume-se o estado de informação imperfeita entre os agentes, isto é, os consumidores conhecem as utilidades das ofertas, mas os ofertantes desconhecem as ofertas instantâneas um do outro. No entanto, os comercializadores conhecem a demanda passada do seu concorrente, pois as operações do mercado são publicadas pela CCEE através de relatórios.

### 4.3 CONHECENDO O SISTEMA

Uma vez que o modelo aplica duas técnicas análise, para tratar a competição entre duas empresas, as variáveis descritas nessa seção para a Comercializadora A são semelhantes da Comercializadora B. A descrição das principais variáveis do modelo, salientando que o índice “A” ou “B” apenas identifica a que empresa está relacionada a variável, é feita a seguir.

- Demanda Consumidores Livres: É a necessidade de energia dos consumidores que participam do ACL.
- Portfólio de Energia: É o montante de energia que a comercializadora contratou para seus clientes naquele mês.
- BdC: É a base de clientes da comercializadora.
- Fator de Cobertura: Representa a capacidade da empresa A de suprir a demanda dos seus clientes sem recorrer ao spot.
- Demanda Spot Potencial: É o montante de energia da comercializadora que sobra após atender os seus clientes, ficando disponível para venda no mercado *spot*.
- Margem Bruta: Determina os lucros com a venda de contratos de energia, afeta o preço e a demanda de equilíbrio de mercado, além do preço final aos clientes.
- PLD: O Preço de Liquidação das Diferenças é utilizado para precificar a energia comercializada no mercado de curto prazo. Sua fórmula de cálculo leva em consideração parâmetros para a otimização do despacho do sistema elétrico (PORTAL PCH, 2016).
- BRIX: Projeções feitas por uma empresa independente e divulgadas publicamente dos preços futuros de energia convencional. A energia é comprada a este preço pelas comercializadoras, de acordo com suas estratégias de compra antecipada (BRIX, 2016).
- Elasticidade do Preço na Demanda: Mede o quanto varia a demanda em relação a variação de preço de energia. É fundamental para definir as funções de demanda vistas na Seção 3.4. Embora não haja estudos específicos sobre o mercado livre, espera-se que a elasticidade de consumidores no mercado livre seja maior do que consumidores industriais e residenciais no cativo (SCHUTZE, 2015).
- Dmax: É a demanda máxima que o mercado é capaz de adquirir em um determinado momento. Assim como a elasticidade, é uma variável que define a função de demanda do mercado.
- Demanda Spot: É a demanda de energia no mercado *spot* em função dos preços ofertados pela empresa e pela concorrência, conforme a Seção 3.4.
- Meta PdM: A estratégia da empresa no longo prazo é definida através da participação de mercado que ela deseja atingir.

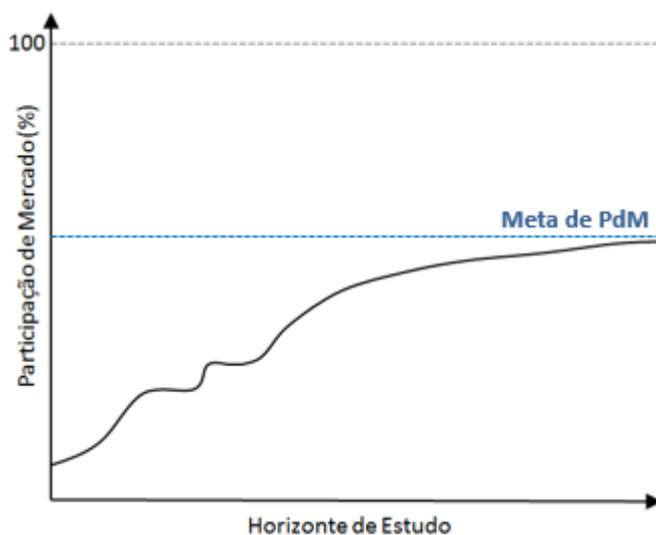
#### 4.4 DETERMINAÇÃO DO MODO DE REFERÊNCIA

A demanda a ser atendida por cada empresa depende da demanda do mercado livre, influenciada por fatores externos ao modelo (como a situação econômica), da decisão dos consumidores que pode, em parte, sofrer influência das estratégias de preço praticada pelas empresas. O comportamento da demanda é testado através das hipóteses de preço e investimentos implementadas no modelo. Essas políticas definem as estratégias empresariais.

A Participação de Mercado (PdM) é um indicador relevante na avaliação do desempenho das empresas, ele é a razão entre a demanda total atendida pela empresa e a demanda de mercado. Constitui-se em uma variável dinâmica, uma vez que depende do comportamento de consumidores e concorrentes.

Uma vez que não há dados históricos disponíveis a validação dos resultados do modelo, essa validação é feita através da comparação com o Modo de Referência (MR). A Figura 15 representa o Modo de Referência do modelo, considerando a participação de mercado de cada empresa como a variável mais relevante do sistema. As oscilações no início da fase de crescimento da PdM da empresa ocorrem devido à concorrência e as ações que são tomadas a fim de superá-la. A empresa tende a atingir sua meta, mas como o equilíbrio é dinâmico, quaisquer alterações nos parâmetros de mercado podem afetar sua participação, fazendo com que novas ações sejam implementadas afim de reestabelecer o equilíbrio.

Figura 15 - Modo de Referência para o Modelo de Mercado.

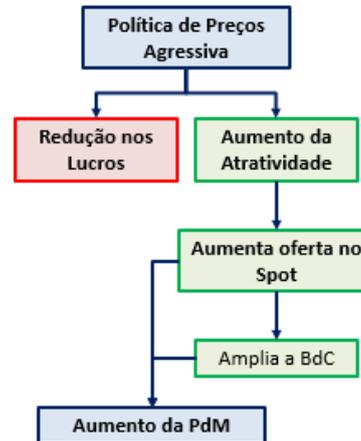


Fonte: Autor.

A consolidação do MR ocorre quando a política de preços de uma empresa é mais agressiva do que a concorrência, ou seja, ela pratica preços menores, como mostra a Figura 16.

Isso compromete os lucros no curto prazo mas amplia a BdC. A base de clientes maior permite ofertar mais energia no mercado *spot* e potencialmente ampliar a BdC. A concorrência resta duas opções, entrar em uma guerra de preços com uma empresa que cresce a uma taxa maior que a sua ou se sujeitar a uma participação de mercado inferior ao previsto.

Figura 16 - Diagrama de Consolidação do Modo de Referência



Fonte: Autor.

#### 4.5 DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL

As relações de causa-efeito entre as variáveis do modelo são representadas através de um Diagrama de Laço Causal (DLC), ilustrado na Figura 17. Esse diagrama contempla tanto o ambiente interno quanto o ambiente externo à empresa.

Iniciando no canto superior esquerdo do diagrama, a “Demanda de Energia Elétrica” aumenta com a evolução da “Economia” e resulta, em parte, no aumento do “Preço de Compra” e na “Demanda Mercado Livre”. O “Preço de Compra” também aumenta em função do “Custo Marginal de Expansão” e decresce em função do “Regime de Chuvas”. O aumento da Demanda Mercado Livre”, por sua vez, induz ao aumento da “Participação de Mercado” e a um maior “Faturamento”. Esses dois fatores ampliam a necessidade de “Investimentos” para atender o crescimento da demanda.

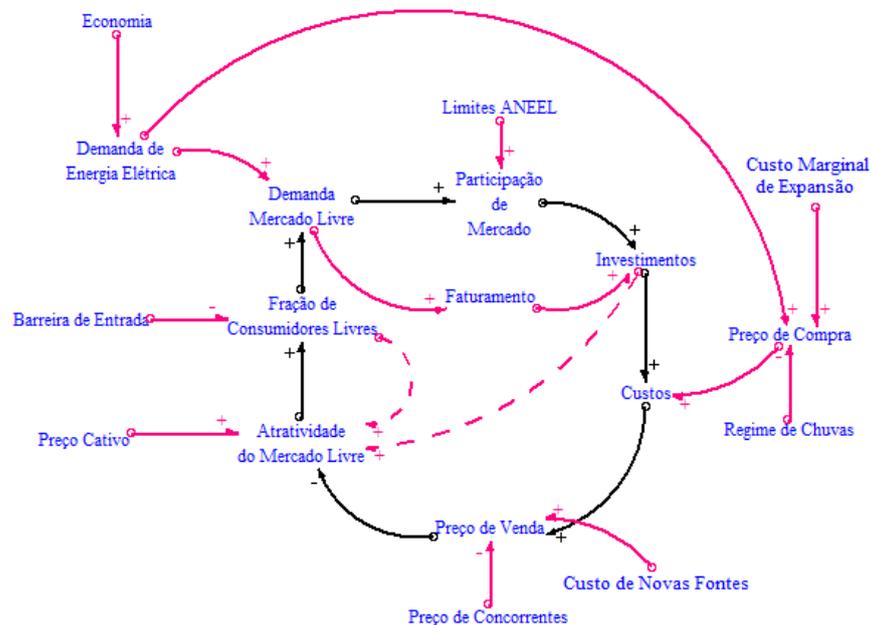
O aumento de investimentos pode elevar os “Custos” no curto prazo, mas tende a reduzi-los no longo prazo. O aumento no “Preço de Compra” afeta diretamente os custos. O “Preço de Venda” cresce com o aumento de “Custos” e “Custo de Novas Fontes” e decresce quando o “Preço da Concorrência” aumenta, no intuito de ganhar competitividade.

A “Atratividade do Mercado Livre” diminui com o aumento do “Preço de Venda” e aumenta com os “Investimentos” realizados pela empresa, esses, no entanto, demoram a surtir

efeito no mercado. O aumento do “Preço Cativo” também contribui para elevar a “Atratividade do Mercado”. A “Fração de Consumidores Livres” aumenta quando o mercado se torna mais atrativo e o mercado se torna mais atrativo quando há mais consumidores nele, logo existe um pequeno *loop* com atraso entre as duas variáveis. Como consequência do aumento da “Fração de Consumidores Livres”, há um aumento na “Demanda Mercado Livre”.

O *loop* que se inicia com a variável “Demanda Mercado Livre” é destacado em preto na Figura 17. Esse grande laço é o que confere a dinâmica ao sistema.

Figura 17 - DLC do Problema de PdM.



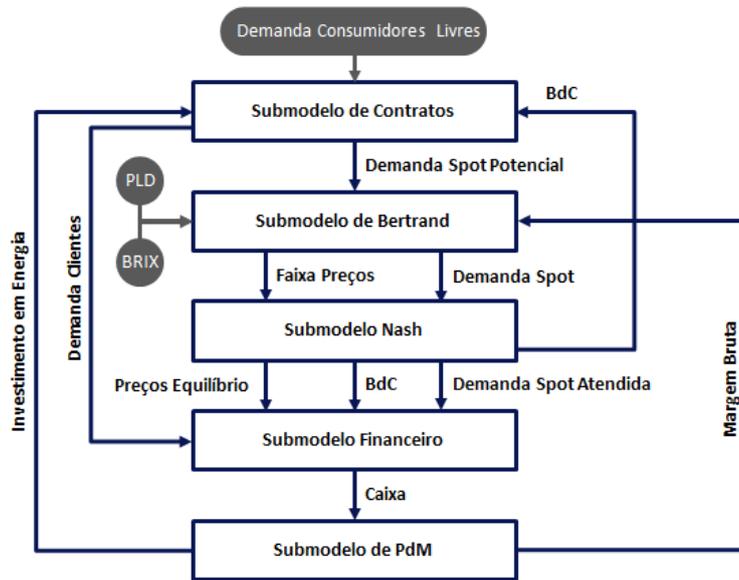
Fonte: Autor.

#### 4.6 O MODELO COMPUTACIONAL

A avaliação do comportamento das variáveis ao longo do tempo é feita através de simulação computacional. Para isso empregam-se *softwares* dedicados a dinâmica de sistemas. Neste trabalho foi escolhido o *software* Powersim Studio versão 10 (“Powersim Studio”, 2016) por permitir o desenvolvimento de funções personalizadas programadas na linguagem C++ e pela facilidade de importação de dados do Microsoft Excel.

O modelo desenvolvido é composto por cinco submodelos: submodelo de contratos, submodelo de Bertrand, submodelo Nash, submodelo financeiro e o submodelo de PdM. Cada submodelo é formado por dois blocos, um para cada empresa, que executam as mesmas funções. As relações entre os submodelos estão representadas na Figura 18.

Figura 18 - Diagrama de Troca de Informação entre Submodelos.

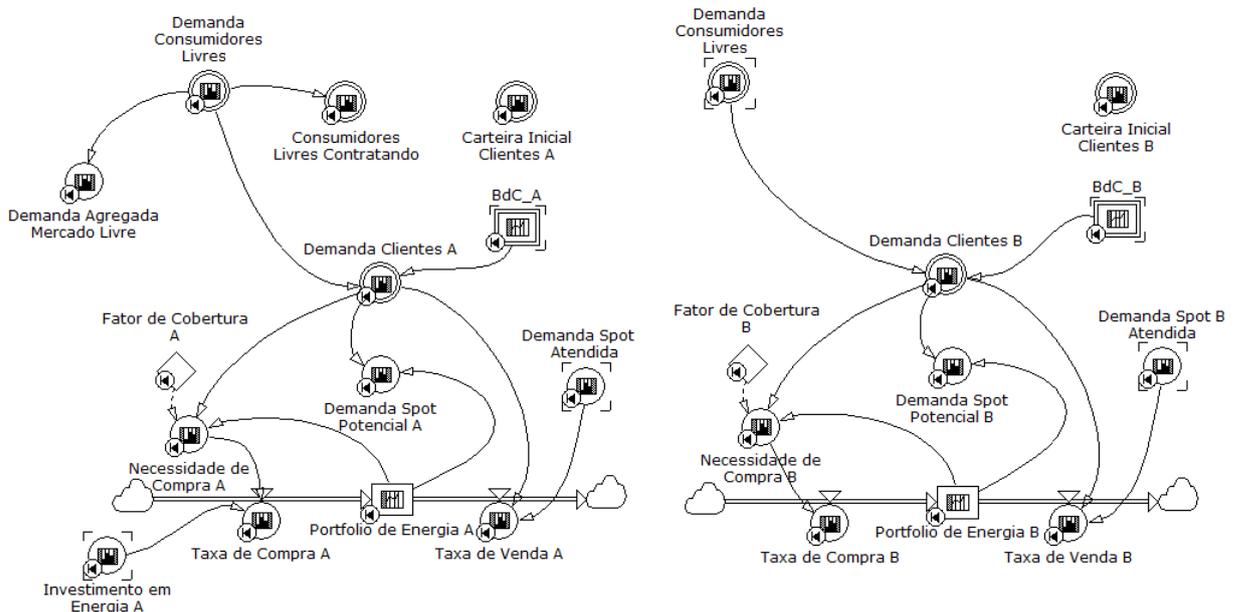


Fonte: Autor.

#### 4.6.1. Submodelo de Contratos

As variáveis que controlam a capacidade de aquisição de clientes, compra de energia e demanda da empresa são representadas na Figura 19. As variáveis cujas bordas estão marcadas com dois traços perpendiculares, como a variável “Demanda Consumidores Livres” são cópias de uma variável homônima no modelo, isso evita que linhas de informação cruzem sobre outras variáveis.

Figura 19 - Submodelo de Contratos.



Fonte: Autor.

A variável “**BdC**” é um vetor binário que representa a base de clientes da empresa A. Cada elemento deste vetor recebe o valor de um caso o consumidor faça parte da base de clientes e zero em caso contrário. A posição do elemento no vetor está relacionada a um cliente específico na base de dados.

A “Demanda Clientes” é o produto entre o vetor “**Demanda Consumidores Livres**” (DCL) e “**BdC**”. Supondo o caso em que há três consumidores cujas demandas são 200, 50 e 100MWmed. Caso somente o primeiro e o último fossem da “**BdC**”, a “Demanda Clientes” expressa pela Equação (36).

$$\text{Demanda Clientes} = [200 \quad 50 \quad 100] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 300 \text{ [MWmed]} \quad (36)$$

A “Demanda Agregada Mercado Livre” (DAML) é a soma da demanda de todos os consumidores em um intervalo de tempo. Já, a variável “**Consumidores Livres Contratando**” é um vetor cujos elementos são iguais a um sempre que o elemento na mesma posição de “**Demanda Consumidores Livres**” for maior do que zero, caso contrário eles recebem o valor zero.

A “Necessidade de Compra” é uma variável auxiliar cujo valor é a diferença entre o “Portfólio de Energia”, a energia que a empresa tem comprada para atender as necessidades dos clientes, e a “Demanda Clientes”, que é a demanda efetiva dos clientes para esse período. Multiplica-se a isso o “Fator de Cobertura”, variável adimensional que representa a estratégia da empresa de operar a descoberto ou não.

A “Demanda *Spot* Potencial” (DSP) representa as sobras de energia que podem ser negociadas no mercado de curto prazo. Seu valor é dado pela Equação (37).

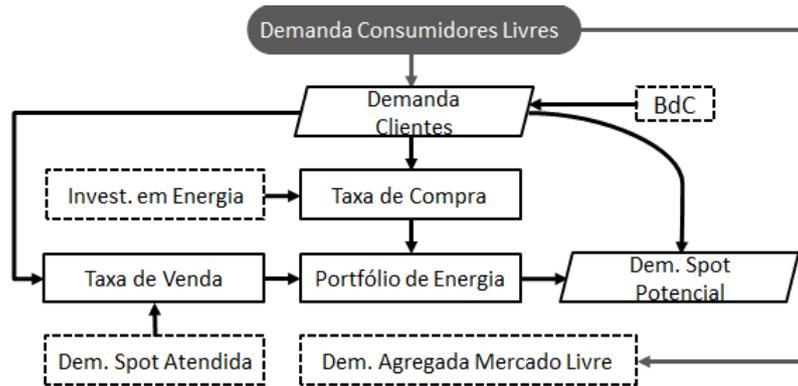
$$\text{DSP} = \begin{cases} \text{Portfólio de Energia} - \text{Demanda Clientes, se DSP} > 0 \text{ [MWmed]} \\ 0 \text{ [MWmed], caso contrário} \end{cases} \quad (37)$$

As “Taxas de Compra e Venda” são representadas pela soma das variáveis ligadas a elas e regulam o nível de “Portfólio de Energia”. O “Investimento em Energia”, ligado a taxa de compra, é uma variável estratégica que é definida nas próximas subseções. A “Demanda *Spot* Atendida” (DAS) representa a quantidade de energia ofertada no mercado *spot* que efetivamente foi vendida. A variável de nível deste submodelo é o “Portfólio de Energia”, inicializado com o valor  $PE_0$  dado em MWmed e definida através da Equação (38).

$$\text{Portfólio de Energia} = \int_{t_0}^t (\text{Taxa de Compra} - \text{Taxa de Venda}) dt + PE_0 \text{ [MWmed]} \quad (38)$$

A Figura 20 representa o submodelo desta seção através de um fluxograma. Na figura, as variáveis dentro de retângulos com bordas tracejadas são calculadas por outros submodelos, já aquelas dentro de retângulos com bordas contínuas são calculadas no próprio submodelo em análise, as variáveis dentro de paralelogramos são variáveis de saída que servem de entrada para de cálculo para outras partes do modelo, por fim a as variáveis dentro de retângulos com bordas arredondadas são dados de entrada para o modelo.

Figura 20 - Fluxograma do Submodelo de Contratos.

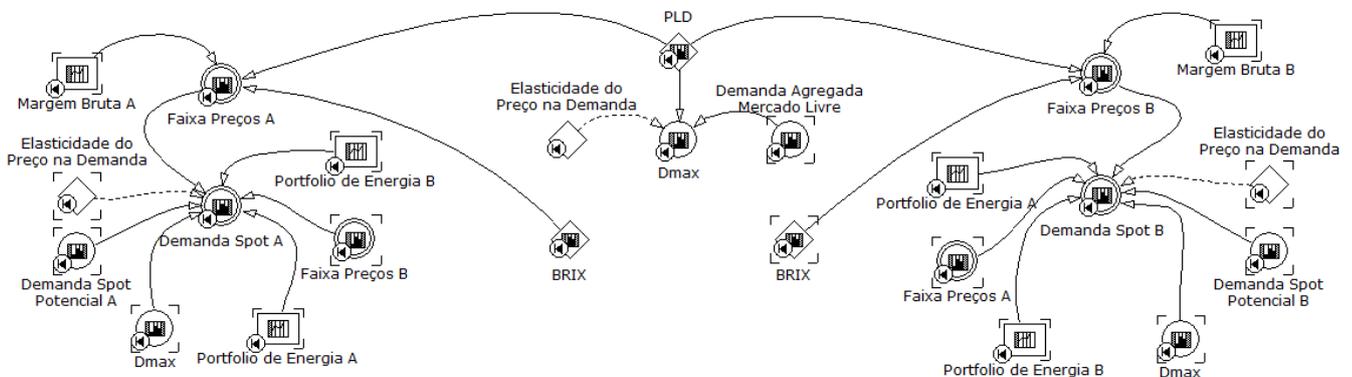


Fonte: Autor.

#### 4.6.2. Submodelo de Bertrand

O objetivo deste submodelo é determinar as diferentes demandas do mercado de curto prazo em função do preço oferecido pelos agentes. Diferentemente do submodelo anterior, no qual o bloco de uma empresa operava independente da outra, aqui as variáveis de A conectam-se a B. A Figura 21 reproduz o submodelo.

Figura 21 - Submodelo de Bertrand.



Fonte: Autor.

Neste submodelo a variável PLD representa a média do preço de liquidação das diferenças no submercado sudeste. Escolheu-se trabalhar somente com esse submercado devido a indisponibilidade de curvas de preço futuro dos demais submercados.

A “Elasticidade do Preço na Demanda” (EPD) é uma constante cujo valor foi estimado com base em estudos do mercado cativo. A variável auxiliar Pmax é preço máximo, calculado segundo a Equação (39) considera que quando o preço de mercado é igual ao PLD a demanda de mercado é igual a “Demanda Agregada Mercado Livre”.

$$P_{max} = PLD + EPD \cdot DAML [R\$] \quad (39)$$

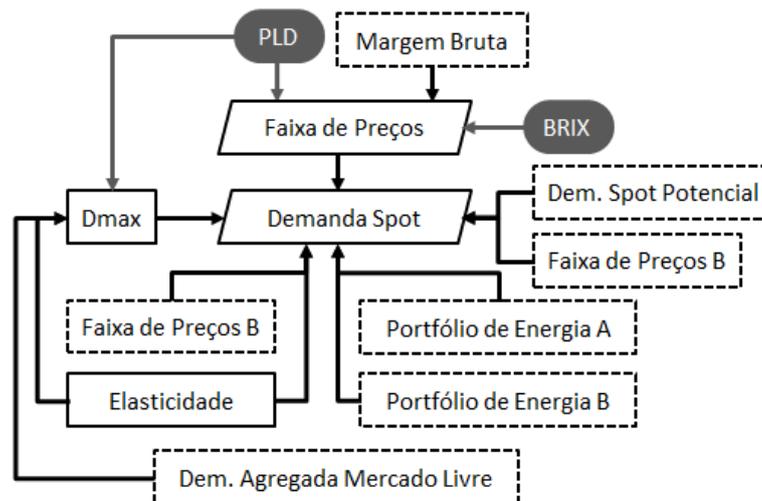
A “**Faixa de Preços**” é um vetor de “n” elementos que representa as possíveis cotações de energia ofertadas pela empresa no mercado spot. A “Margem Bruta” (MB) é uma das variáveis estratégicas, é discutida nas próximas subseções. A Equação (40) define a “Faixa de Preços”.

$$\text{Faixa de Preços}_i = \begin{cases} BRIX \cdot (1 + MB) + (PLD - BRIX) \cdot \frac{i}{n}, & \text{se } PLD > BRIX \\ PLD \cdot (1 + MB) + (BRIX - PLD) \cdot \frac{i}{n}, & \text{se } PLD < BRIX \end{cases} \quad (40)$$

A variável “**Demanda Spot**” é uma matriz na qual cada elemento representa uma demanda em função da “**Faixa de Preços A**” e da “**Faixa de Preço B**”, conforme a Equação (19). As colunas representam variações devido aos preços de B e as linhas, os de A.

A Figura 22 representa o submodelo desta seção através de um fluxograma. A convenção de símbolos é a mesma adotada na Figura 20.

Figura 22 - Fluxograma do Submodelo de Bertrand.

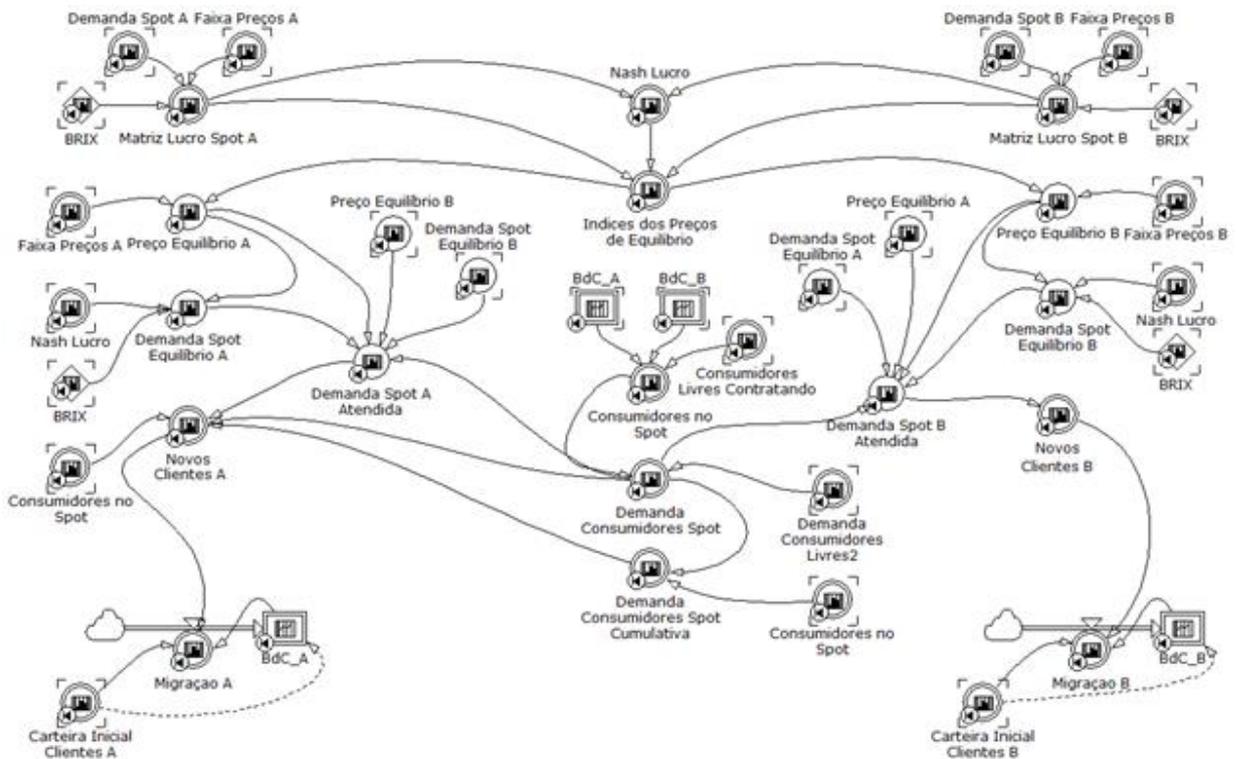


Fonte: Autor.

### 4.6.3. Submodelo de Nash

O objetivo do submodelo de Nash, Figura 23, é determinar o equilíbrio do mercado *spot*, indicando a quantidade de energia que cada empresa consegue vender, qual o preço de equilíbrio para cada uma. Além disso, ele estabelece quais consumidores são atendidos, e quais migram para cada empresa. A principal premissa é a de que os consumidores que compram no mercado livre sem fazer parte da carteira de clientes das empresas são potenciais clientes para essas empresas, a aquisição destes clientes está condicionada a capacidade de cada empresa de atender sua demanda no mercado *spot*.

Figura 23 - Submodelo de Nash.

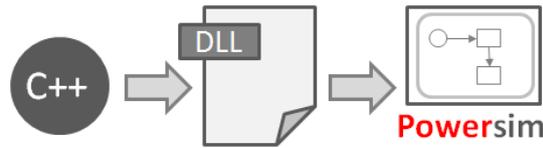


Fonte: Autor.

A determinação do equilíbrio de mercado é feita através do algoritmo de Lemke-Howson discutido na Seção 3.5. Inicialmente são formadas as variáveis “Matrizes Lucro *Spot* A e B”, a partir da Equação (21). Posteriormente essas variáveis são utilizadas como dados de entrada para a variável “Nash Lucro” que executa uma função customizada.

Conforme ilustrado pela Figura 24 um código em linguagem C++ baseado no algoritmo descrito na Seção 3.5 foi desenvolvido utilizando a biblioteca de álgebra linear *armadillo* (SANDERSON; CURTIN, 2016). Adaptando o código para uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) foi possível que o *software* Powesim executasse a função. A saída da variável é o lucro, em reais, possível de ser obtido com a venda de energia no mercado *spot*.

Figura 24 - Criação de Funções Personalizadas no Powersim.



Fonte: Autor.

Duas variáveis estão diretamente relacionadas a Nash Lucro, são elas o “Preço Equilíbrio” (PE) e “Demanda *Spot* Equilíbrio” (DSE). Essa variáveis recebem os índices da posição de equilíbrio dos vetores “**Faixa de Preços**” e “**Demanda *Spot***” retornando respectivamente o preço, em R\$/MWmed, de equilíbrio da oferta de energia e a demanda de equilíbrio, em MWmed, para cada empresa no ponto de Equilíbrio de Nash no mercado de curto prazo.

O vetor “**Consumidores no *Spot***” (CS), cuja formulação segue a Equação (41), descreve os “**Consumidores Livres Contratando**” (CLC) que não fazem parte da “**Base de Clientes**” de nenhuma das duas empresas. A “Demanda Consumidores *Spot*” (DCS) é a demanda de cada um dos consumidores no *spot*, dada pelo produto, elemento a elemento, dos vetores “**Demanda Consumidores Livres**” e “**Consumidores no *Spot***”.

$$\text{Consumidores no Spot}_i = (1 - BdC_{A_i} - BdC_{B_i}) \cdot CLC_i \quad (41)$$

O propósito de utilizar a variável auxiliar “Demanda *Spot* Atendida” (DSA) ao invés de utilizar diretamente a “Demanda *Spot* Equilíbrio” é devido ao fato de que a demanda efetivamente vendida no mercado *spot* por cada empresa fica limitada a demanda total que o mercado de curto prazo necessita, subtraído da demanda já fornecida pela concorrente, caso o “Preço de Equilíbrio” dela seja menor. Sua formulação é exposta na Equação (42).

$$DSA_A = \begin{cases} DSE_A, & \text{se } PE_A < PE_B \text{ e } DSE_A < DCS \\ DCS - DSE_B, & \text{se } PE_A > PE_B \text{ e } (DSE_A - DSE_B) < DCS \\ DCS \cdot \left(1 - \frac{DSE_A}{DSE_B}\right), & \text{se } PE_A = PE_B \text{ e } (DSE_A - DSE_B) < DCS \end{cases} \quad [\text{MWmed}] \quad (42)$$

Antes de definir a variável “**Novos Clientes**” é importante formalizar a variável auxiliar “**Demanda Consumidores *Spot* Cumulativa**” (DCSC), um vetor no qual os elementos são a soma cumulativa dos elementos de DCS. A variável “**Novos Clientes**” caracteriza, na forma de um vetor binário, os consumidores atendidos no mercado de curto prazo pela empresa, comparando a **BdC** das duas empresas com a DCS.

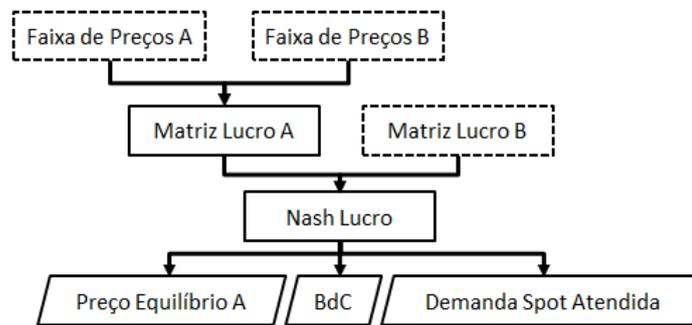
$$DCSC_i = CS_i \cdot \left( \sum_{j=1}^i DCS_j \right) \quad [\text{MWmed}] \quad (43)$$

O último conjunto de variáveis deste submodelo tem o papel de atualizar a base de clientes após as negociações no mercado de curto prazo. Portanto a taxa “**Migração**” é binária, na forma de um vetor, recebendo o valor um sempre que o elemento do vetor “**BdC**” for zero e o elemento da variável “**Novos Clientes**” ou “**Carteira Inicial Clientes**” for um. Caso “**BdC**” já tenha o valor um, a taxa é zero. A variável de nível “**BdC**” é inicializada com os valores “**Carteira Inicial Clientes**” e armazena valor segundo a Equação (44).

$$BdC = \int_{t_0}^t (\text{Migração})dt + \text{Carteira Inicial Clientes} \quad (44)$$

A Figura 25 representa o submodelo desta seção através de um fluxograma. A convenção de símbolos é a mesma adotada na Figura 20.

Figura 25 - Fluxograma do Submodelo de Nash.



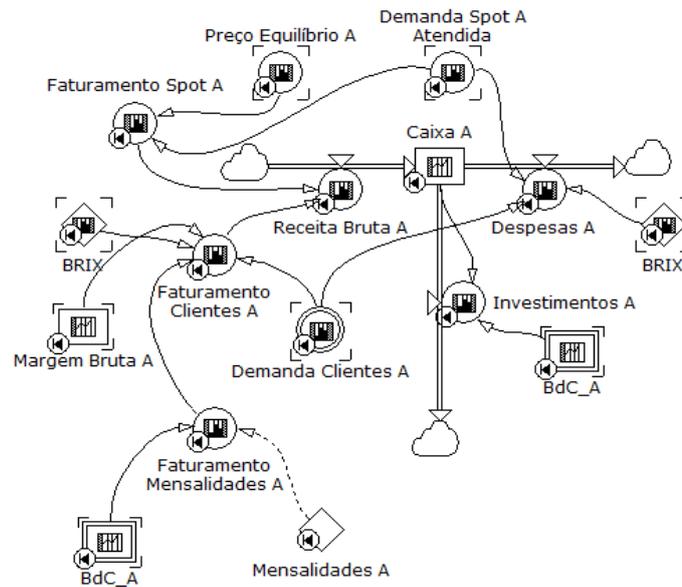
Fonte: Autor.

#### 4.6.4. Submodelo Financeiro

Este submodelo apresenta uma modelagem simplificada da estrutura financeira de uma empresa de comercialização. A modelagem real da estrutura financeira dessas empresas não é o escopo deste trabalho.

A Figura 26 ilustra o submodelo financeiro da Comercializadora A, sua concorrente possui uma estrutura idêntica. A receita das empresas é composta de duas parcelas, a primeira advém da venda de energia e a segunda de mensalidades pagas pelos clientes por serviços de consultoria, controle e monitoramento realizados pelo braço de gestão da empresa.

Figura 26 - Submodelo Financeiro.



Fonte: Autor.

Adotou-se a premissa de que a mensalidade para cada cliente da empresa tem o mesmo valor, desta forma a variável “Faturamento Mensalidades” (FM) é o produto entre o número de clientes da empresa, ou seja, a soma de todos os elementos de “**BdC**”, e a constante “Mensalidades”, que representa o valor das mensalidades em reais.

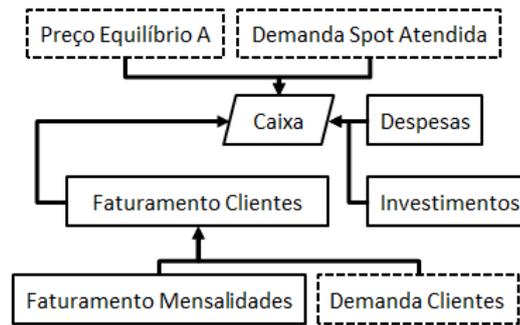
O “Faturamento Clientes” corresponde a receita bruta obtida com a venda de energia aos clientes da empresa, agregado a receita das mensalidades. Sua definição matemática é dada pela Equação (45).

$$\text{Faturamento Clientes} = \text{BRIX} \cdot (1 + \text{MB}) \cdot \left( \sum_{i=1}^n \text{Demanda Clientes}_{A_i} \right) + \text{FM}_A \text{ [R\$]} \quad (45)$$

O “Faturamento *Spot*”, dado em reais, é o produto entre o “Preço Equilíbrio” e a “Demanda *Spot* Atendida”. A “Receita Bruta” é a soma do “Faturamento *Spot*” com o “Faturamento Clientes”. A variável “Despesas” é o produto entre toda a energia vendida (Demanda *Spot* Atendida + Demanda Clientes) pelo seu preço de aquisição (BRIX). As despesas de manutenção da “**BdC**” e gastos de marketing ficam representadas pela variável “Investimentos”.

A Figura 27 representa o submodelo desta seção através de um fluxograma. A convenção de símbolos é a mesma adotada na Figura 20.

Figura 27 - Fluxograma do Submodelo Financeiro.

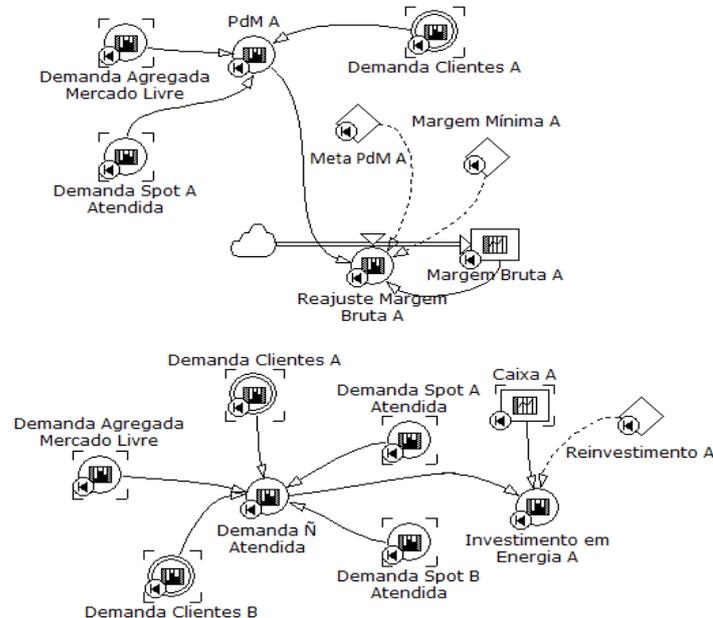


Fonte: Autor.

#### 4.6.5. Submodelo de Participação de Mercado

No submodelo representado pela Figura 28, a empresa verifica seu alinhamento estratégico comparando a sua meta de participação do mercado com a PdM realizada. A PdM da empresa é calculada através da razão entre a sua demanda total (**Demanda Spot Atendida + Demanda Clientes**) e a **Demanda Agregada Mercado Livre**, que representa a demanda total do mercado.

Figura 28 - Submodelo de PdM.



Fonte: Autor.

Caso a PdM da empresa esteja abaixo do planejado (**Meta PdM**) ela reduz a “**Margem Bruta**”, definida pela Equação (47), diminuindo seus preços e aumentando a competitividade. Isso é feito através da variável “**Reajuste Margem Bruta**” (RMB), cuja formulação é dada pela Equação (46).

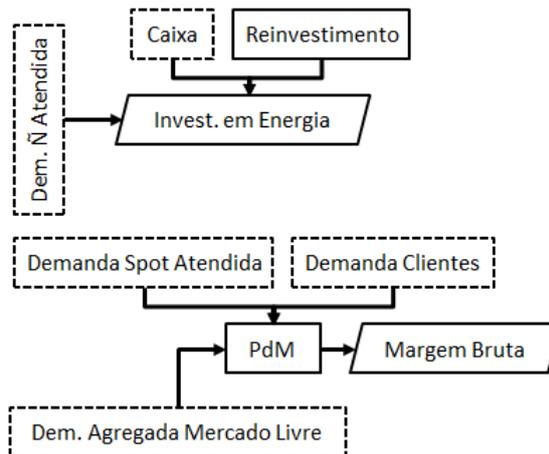
$$\text{RMB} = \begin{cases} \frac{\text{Meta PdM} - \text{PdM}}{\text{Meta PdM}} \cdot (-1\%), & \text{se MB} \geq \text{Margem Mínima} \\ 0\%, & \text{se MB} \leq \text{Margem Mínima} \end{cases} \quad (46)$$

$$\text{Margem Bruta} = \int_{t_0}^t \text{RMB} dt + \text{Margem Bruta}_{\text{inicial}} \quad (47)$$

Por último a empresa define o “Investimento em Energia”, isto é, o quanto de energia que será comprado a mais no próximo período. Para isso é calculada a demanda não atendida pelas empresas A e B, subtraindo da DAML a demanda total de cada empresa. O “Investimento em Energia” é o produto do coeficiente de “Reinvestimento” pela “Demanda Não Atendida”, caso o “Caixa” seja positivo, senão o “Investimento em Energia” é 0 MWmed.

A Figura 29 representa o submodelo desta seção através de um fluxograma. A convenção de símbolos é a mesma adotada na Figura 20.

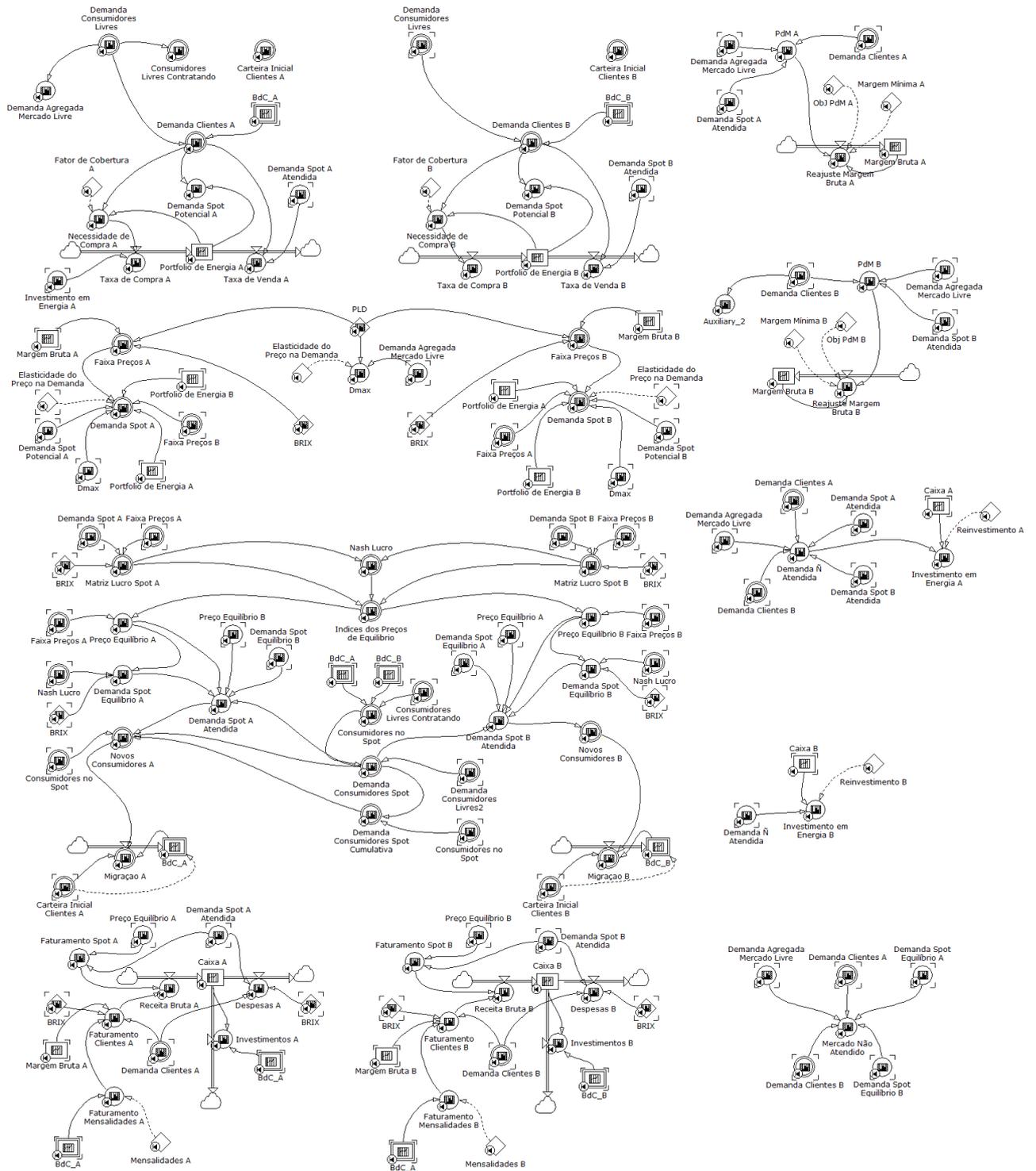
Figura 29 - Fluxograma do Submodelo de PdM.



Fonte: Autor.

Os submodelos apresentados anteriormente compõem o modelo completo, cuja estrutura é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Modelo Computacional Completo.



Fonte: Autor.

#### 4.7 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

A determinação dos parâmetros é uma etapa relevante que ocorre concomitantemente a construção do modelo computacional. Aqui são apresentados os valores das principais

variáveis do modelo. Utilizam-se fontes de dados oficiais sempre que eles estiverem disponíveis.

A seguir são apresentados os valores dos parâmetros utilizados no modelo computacional, bem como as referências e/ou método para estimação de cada variável.

- Demanda Consumidores Livres: Valores referentes a demanda de energia contratada por cada consumidor. Esses valores passaram a ser divulgados de forma analítica pela CCEE (CCEE, 2016b), através de relatórios mensais;
- Preço de Liquidação das Diferenças: O histórico de preços é informado pela CCEE com base semanal (CCEE, 2016a), com a série histórica iniciando em julho de 2001. Para obter a média mensal são ponderados os preços semanais por patamar de carga pelo número de horas por patamar (CCEE, 2016c);
- Curva de Preço Futuro: A curva de preço futuro orienta as estratégias de compra das empresas. A metodologia adotada pela CCEE (CCEE, 2015) utiliza os *softwares* NEWAVE e DECOMP, executados sequencialmente para cada mês da projeção, utilizando as funções de custo futuro do período anterior. Embora sua metodologia seja próxima a adotada pelo ONS no cálculo do PLD, não foi encontrado um banco de dados com o histórico de projeções. A Brazilian Intercontinental Exchange, “BRIX”, é uma plataforma eletrônica de comercialização de energia elétrica. Além disso a plataforma calcula e divulga seu histórico de projeção do PLD (BRIX, 2016). Este histórico de projeções é utilizado nas simulações;
- Estratégias de Compra: Determina com quantos meses de antecedência é comprada a energia. Seu valor inicial é de três meses, podendo ser de seis ou doze meses dependendo da simulação;
- Margem mínima: É o valor mínimo da margem de lucro nas operações de venda de energia, tanto a clientes quanto a liquidação no mercado de curto prazo. Seu valor inicial é de 5%;
- Reinvestimento: Define o percentual do caixa que será investido em compra de energia para ofertar a clientes em potencial. É uma variável estratégica de cada empresa. Iniciada como 20%.

## 5 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Neste capítulo são testadas possíveis conjunturas de mercado com o simulador desenvolvido. São consideradas duas empresas com estratégias distintas. O mercado é formado por consumidores livres do submercado sudeste, uma vez que só foram encontradas curvas de preço futuro para esse submercado.

### 5.1 CENÁRIO 1: COOPERAÇÃO

Na primeira simulação, cada comercializadora aplica uma margem bruta de 15% e tem como meta atingir uma PdM de 50%. Ambas as empresas detêm 24% do mercado no início da simulação e adotam a mesma estratégia de compra, com 60 dias de antecedência.

Os parâmetros em comum da simulação são resumidos no Quadro 10.

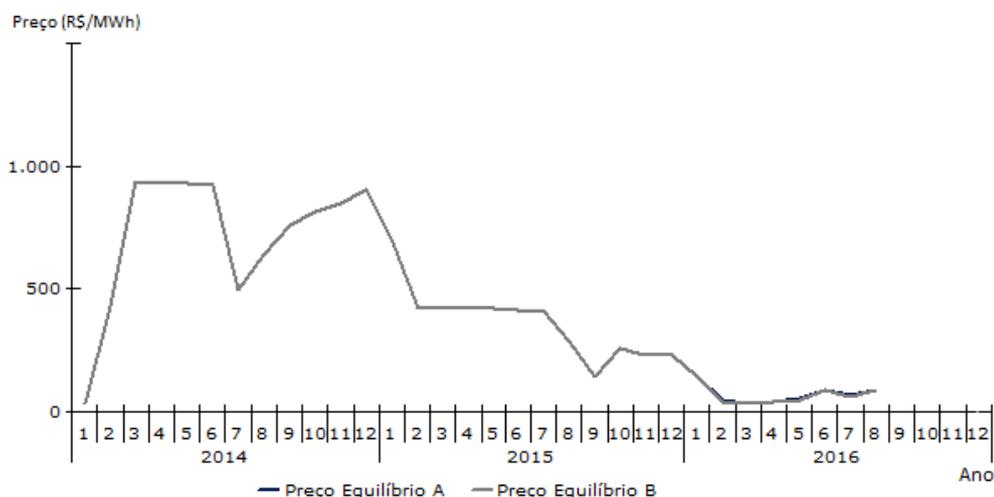
Quadro 10 - Parâmetros da Simulação do Cenário 1.

Período de análise: janeiro de 2014 a outubro de 2016	
Portfólio inicial de energia = 4032 MWmed	Fator de cobertura = 1
Elasticidade da demanda = 1,2 R\$/ MWh	Margem bruta inicial = 15%
Reinvestimento em energia = 20%	Metas de PdM = 50% e 50%

Fonte: Autor.

A Figura 31 mostra que o equilíbrio de preços se estabelece desde o começo, nenhuma das empresas têm motivação para reduzir seu preço. Observa-se pequenas diferenças de preço no ano de 2016 devido a diferenças na estrutura de custos das empresas que afetam seus preços.

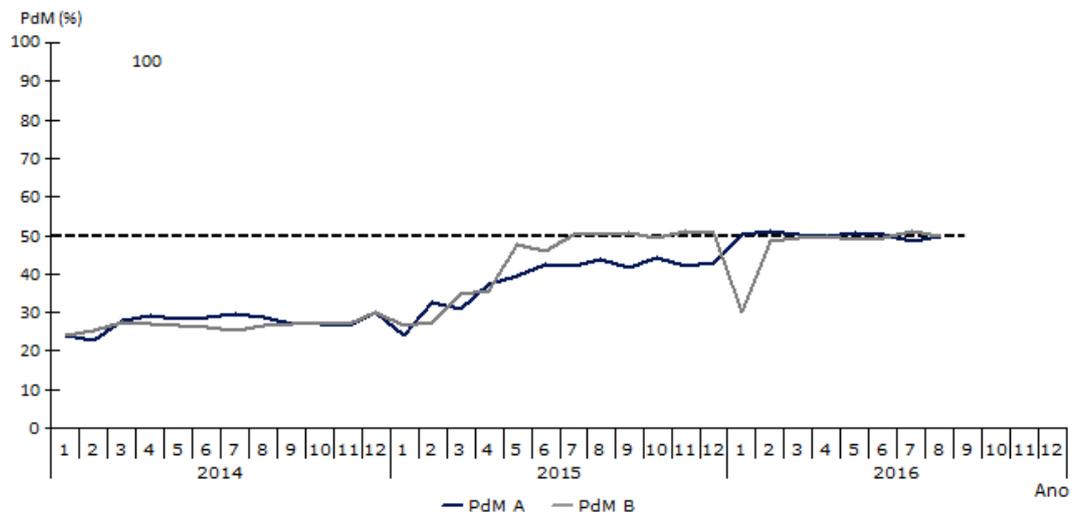
Figura 31 - Cenário 1 - Preços Ofertados.



Fonte: Autor.

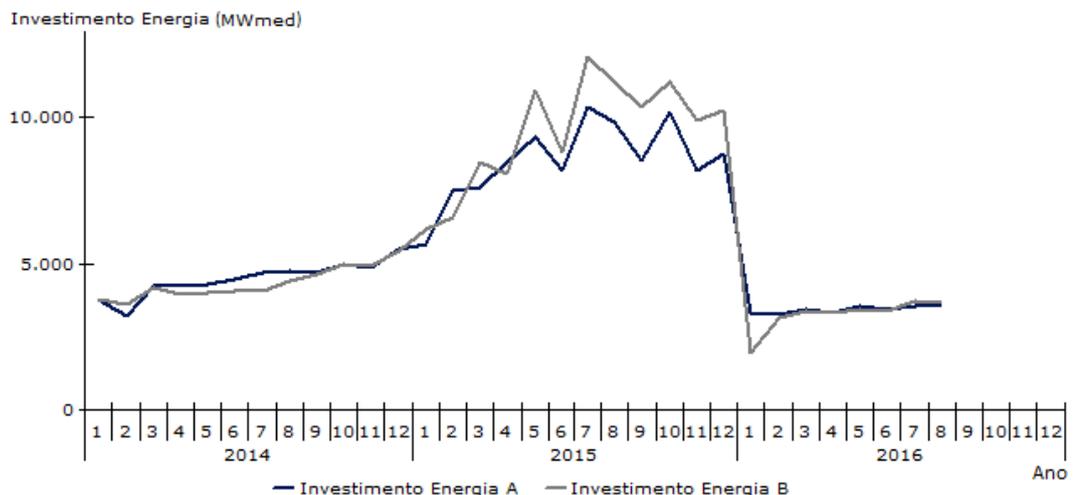
O gráfico da Figura 32 mostra a participação de mercado das Comercializadoras A e B ao longo do tempo. Observa-se que em janeiro de 2016 há uma queda de 20% na participação de B. Isso ocorre pelo fato de que nesse mês há um crescimento no número de consumidores livres no mercado e a empresa B não consegue atendê-los devido a limitação de energia disponível no seu portfólio. No período seguinte B compra um volume maior de energia, ofertando a um preço menor que a concorrente, como mostram as Figura 31 e Figura 33.

Figura 32 - Cenário 1 - Participação de Mercado.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Cenário 1 - Investimento em Energia.



Fonte: Autor

Como mostra a Figura 32 a participação final de mercado das empresas A e B é de 49,8% e 50,1%, respectivamente. O perfil de investimento em energia das duas empresas, ilustrado na Figura 33, é muito semelhante. As maiores diferenças aparecem no segundo semestre de 2015, quando a empresa B que detinha até então uma participação de mercado inferior, investe para atingir sua meta de PdM.

## 5.2 CENÁRIO 2: COMPETIÇÃO E LIDERANÇA DE MERCADO

Na segunda simulação a Comercializadora A aplica uma margem bruta de 15% e tem como meta atingir uma PdM de 30%. Já a Comercializadora B, que também aplica a mesma margem bruta inicial, tem como meta atingir 70% de PdM. Ambas as empresas detêm 24% do mercado no início da simulação e adotam a mesma estratégia de compra, com 60 dias de antecedência.

Os parâmetros em comum da simulação são resumidos no Quadro 11.

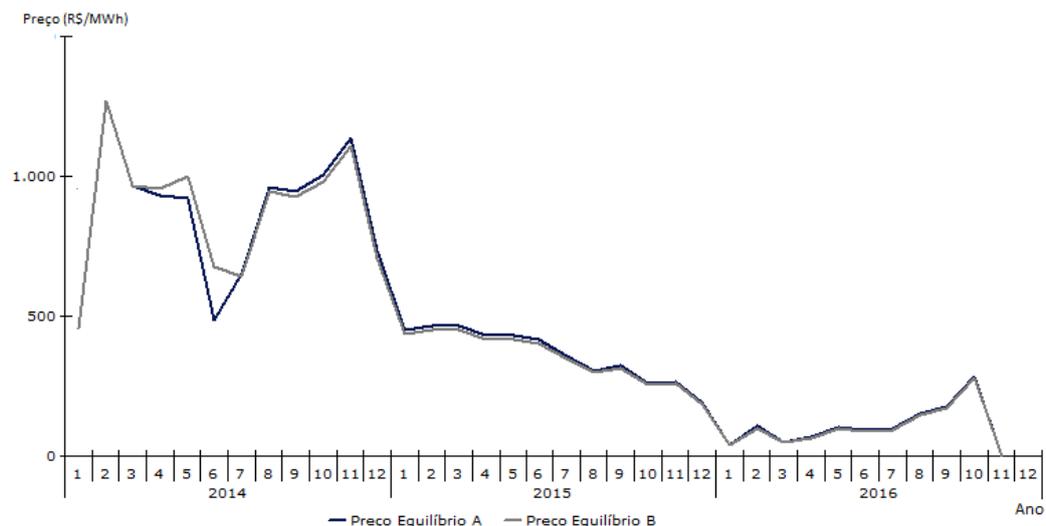
Quadro 11 - Parâmetros da Simulação do Cenário 2.

Período de análise: janeiro de 2014 a outubro de 2016	
Portfólio inicial de energia = 4032 MWmed	Fator de cobertura = 1
Elasticidade da demanda = 1,2 R\$/ MWh	Margem bruta inicial = 15%
Reinvestimento em energia = 20%	Meta s de PdM = 30% e 70%

Fonte: Autor.

A Figura 34 mostra a ocorrência de guerra de preços entre os meses de fevereiro e junho de 2014. Após o mercado se equilibra e as empresas passam a operar próximo a sua margem mínima. Observa-se também que não foi imposta a condição de teto de preços quando o PLD atinge seu máximo valor de R\$ 822,83 nos meses de fevereiro, março e abril de 2014.

Figura 34 - Cenário 2 - Preços Ofertados.

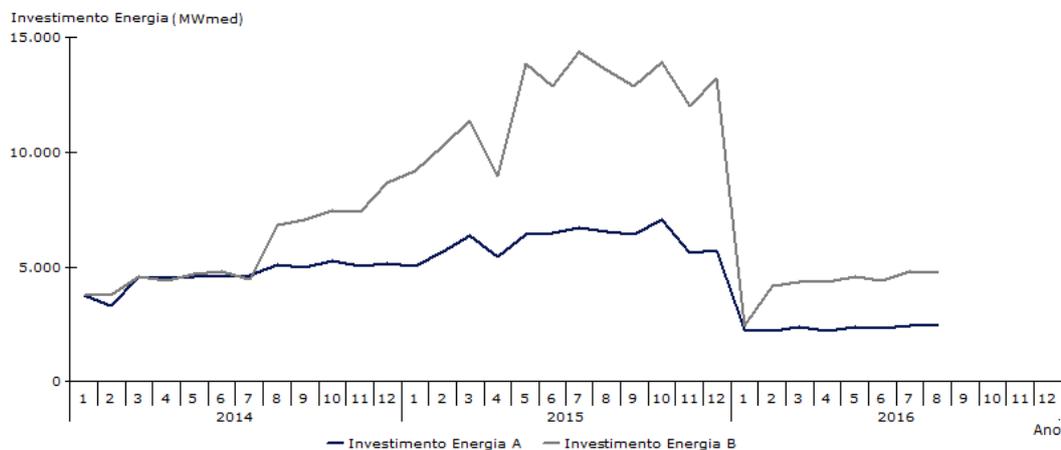


Fonte: Autor.

A Figura 34 apresenta a evolução temporal da participação de mercado das duas empresas. Observa-se que no período da guerra de preços, o crescimento da participação das duas empresas é muito semelhante. No entanto, quando o equilíbrio de preços se estabelece, a

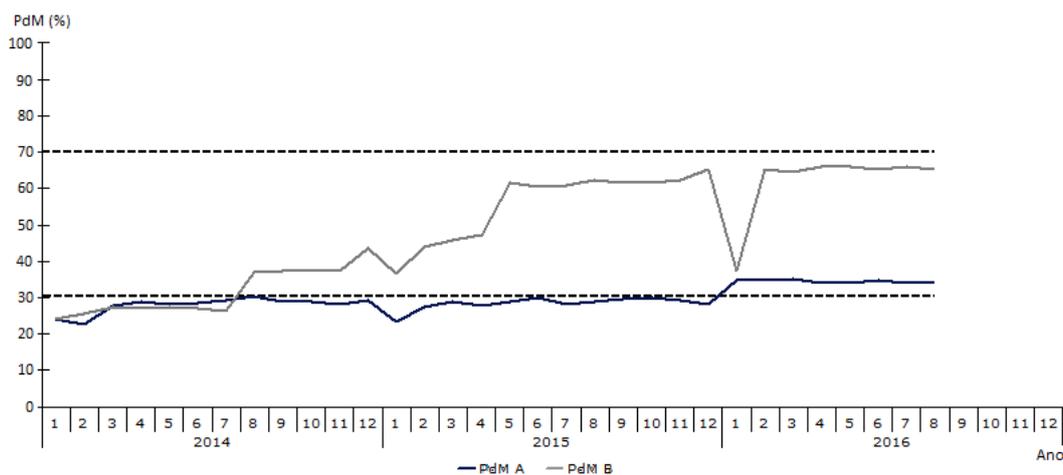
empresa B inicia um ciclo de expansão, investindo em energia para oferecer a novos clientes, como mostra a Figura 35.

Figura 35 - Cenário 2 - Investimento em Energia.



Fonte: Autor.

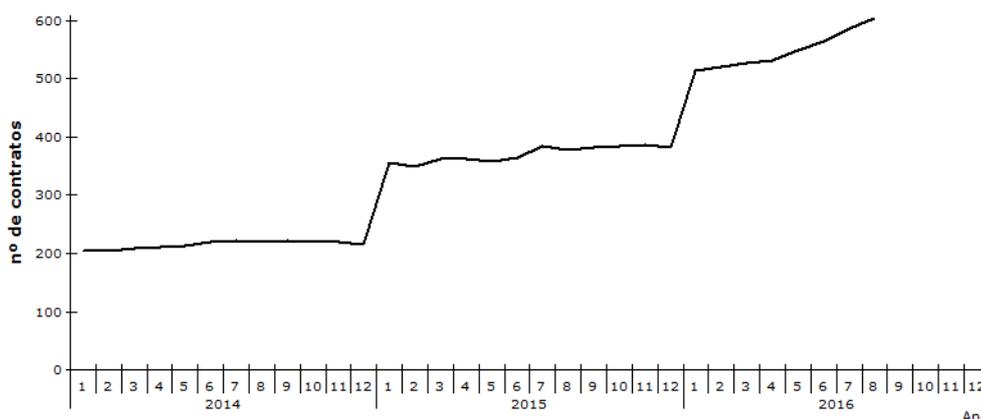
Figura 36 - Cenário 2 - Participação de Mercado.



Fonte: Autor.

A participação final de mercado das empresas A e B é de 34,5% e 65,4%, respectivamente. A principal diferença entre o gráfico da Figura 36 e os gráficos de participação de mercado do Apêndice B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE é o fato de que nesta simulação o mercado não é uniforme, ou seja, o número de consumidores contratando varia com o passar do tempo e a demanda de cada um deles segue um perfil específico representado na matriz da variável Demanda Consumidores Livres. A Figura 37 mostra o número de contratos no ACL em função do tempo.

Figura 37 - Número de consumidores livres do sudeste contratando energia no ACL.



Fonte: Autor.

Um aspecto de mercado relativo a preço que pode ser observado no período de transição entre 2015 e 2016, conforme a Figura 36, tornou os resultados aparentemente menos coesos. Devido a isso foi incluído um Apêndice B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE no qual a variável “**Demanda de Consumidores Livres**” é coerente durante o período de estudo.

### 5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O objetivo da análise de sensibilidade é verificar a robustez do sistema quando seus parâmetros são alterados, identificando aqueles que causam uma mudança significativa em sua resposta. Depois disso verifica-se se o comportamento do sistema, nessas condições, é aceitável.

Os parâmetros predefinidos do Quadro 12 foram mantidos constantes para as duas empresas durante as simulações, salvo as alterações descritas nas tabelas de sensibilidade para cada variável.

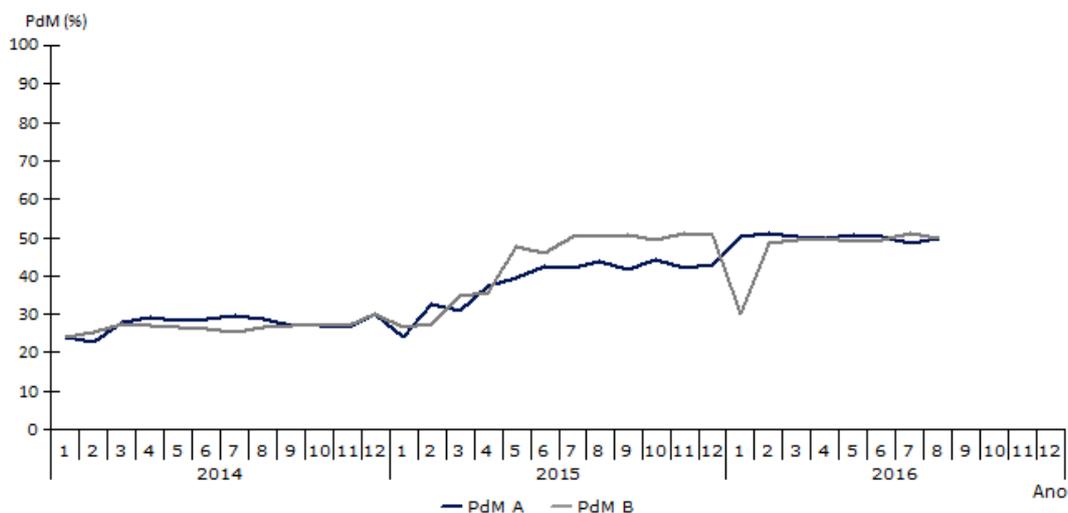
Quadro 12 - Parâmetros de Referência para Análises de Sensibilidade.

Período de análise: janeiro de 2014 a outubro de 2016	
Portfólio inicial de energia = 4032 MWmed	Fator de cobertura = 1
Elasticidade da demanda = 1,2 R\$/ MWh	Margem bruta inicial = 15%
Reinvestimento em energia = 20%	Meta de PdM = 50%

Fonte: Autor

A simulação com os parâmetros de referência é apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Gráfico de Referência para Análise de Sensibilidade com PdM A = PdM B.



Fonte: Autor.

A análise de sensibilidade da variável Meta de PdM foi realizada mantendo uma das variáveis fixa em 50% e a outra reduzida do valor de referência conforme o Quadro 13. Neste quadro é possível observar a participação de mercado de cada empresa no final do período.

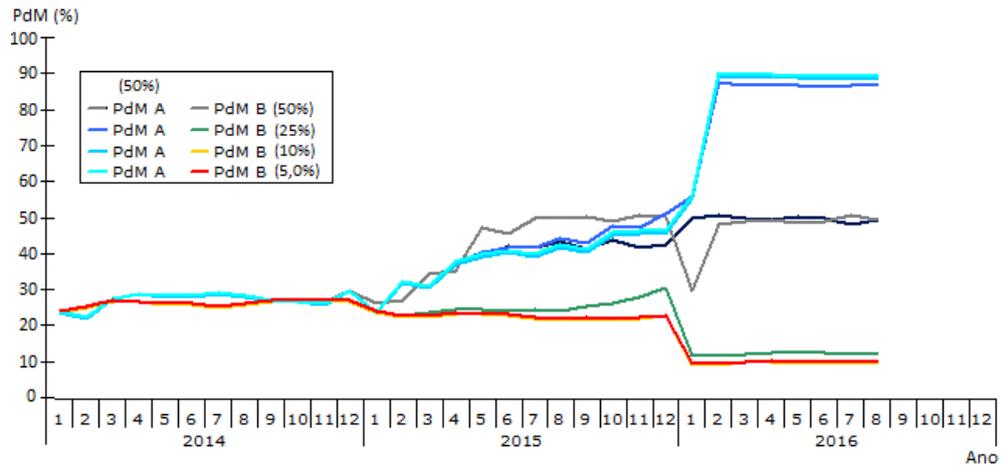
Quadro 13 - Análise de Sensibilidade da Meta de PdM.

Meta PdM A (%)	Meta PdM B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
50	50	49,8	50,1
50	25	86,7	12,7
50	10	89,1	10,3
50	5,0	89,2	10,4

Fonte: Autor.

A Figura 39 mostra que a sensibilidade com relação a Meta de Participação é perceptível, o Reinvestimento decresce de maneira significativa, limitando a capacidade de oferta da empresa. Além disso, ao reduzir a Meta de Participação a Margem Bruta é descontada por um período menor, consequentemente a empresa opera com preços superiores a concorrente, tornando suas ofertas menos competitivas.

Figura 39 - Análise de Sensibilidade - Meta PdM.



Fonte: Autor.

A análise de sensibilidade da Margem Bruta Inicial foi realizada de maneira análoga a variável Meta de Participação de Mercado. Os resultados no final do período de estudo estão resumidos no Quadro 14.

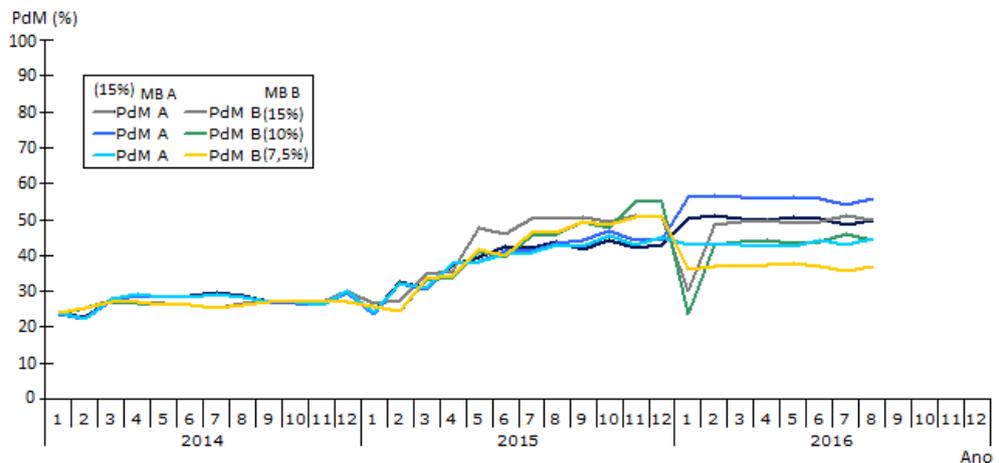
Quadro 14 - Análise de Sensibilidade da Margem Bruta Inicial.

MB Inicial A (%)	MB Inicial B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
15	15	49,8	50,1
15	10	50,7	44,2
15	5	44,7	36,7

Fonte: Autor.

A Figura 40 evidencia que a redução na Margem Bruta compromete o Caixa, afetando a capacidade de investimento da empresa e, como consequência, sua Participação de Mercado nos períodos futuros.

Figura 40 - Análise de Sensibilidade - Margem Bruta.



Fonte: Autor

O Quadro 15 apresenta da análise de sensibilidade da variável Reinvestimento em Energia.

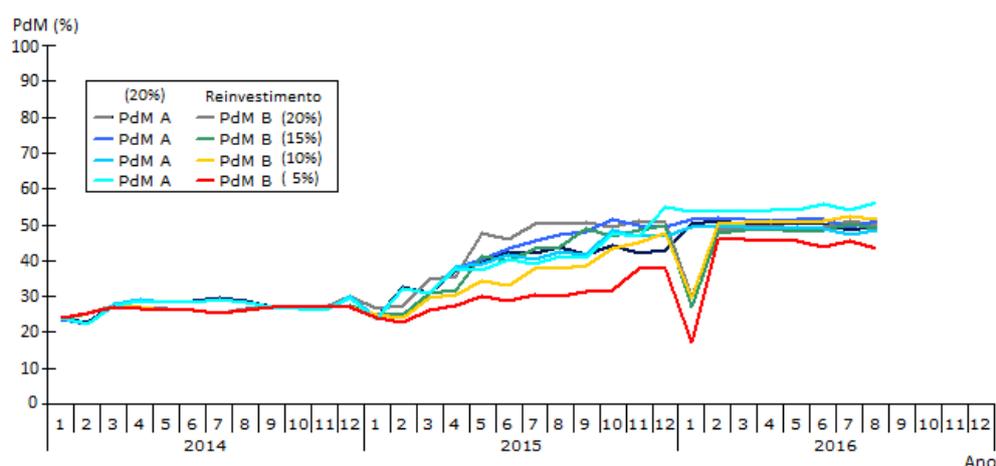
Quadro 15 - Análise de Sensibilidade de Reinvestimento.

Reinvestimento A (%)	Reinvestimento B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
20	20	49,8	50,1
20	15	50,9	49,0
20	10	48,3	51,6
20	5	56,0	43,6

Fonte: Autor.

A Figura 41 demonstra que a política de Reinvestimento da empresa apresenta um peso importante na capacidade de ofertar energia no mercado e como consequência, de aumentar sua PdM.

Figura 41 - Análise de Sensibilidade - Reinvestimento.



Fonte: Autor.

O Quadro 16 apresenta da análise de sensibilidade da variável Mensalidade. A variação na Mensalidade altera o Caixa que, como consequência, modifica a capacidade de Reinvestimento em Energia.

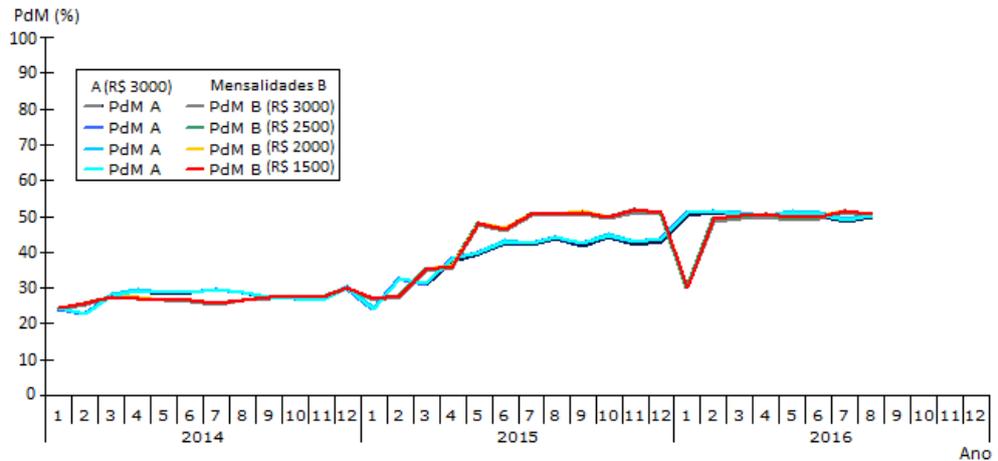
Quadro 16 - Análise de Sensibilidade das Mensalidades.

Mensalidades A (R\$)	Mensalidades B (R\$)	PdM A (%)	PdM B (%)
3000	3000	49,8	50,1
3000	2500	49,8	50,1
3000	2000	49,7	50,2
3000	1500	49,7	50,2

Fonte: Autor.

A Figura 42 apresenta o efeito da alteração da variável Mensalidades.

Figura 42 - Análise de Sensibilidade das Mensalidades.



Fonte: Autor.

O Quadro 17 apresenta da análise de sensibilidade da variável Fator de Cobertura. A variação no Fator de Cobertura faz com que a empresa esteja exposta ao PLD, ou seja, é necessário comprar energia mais cara para atender seus clientes. Isso não altera sua BdC, no entanto prejudica seu Caixa e, como consequência, sua capacidade de Reinvestimento em Energia.

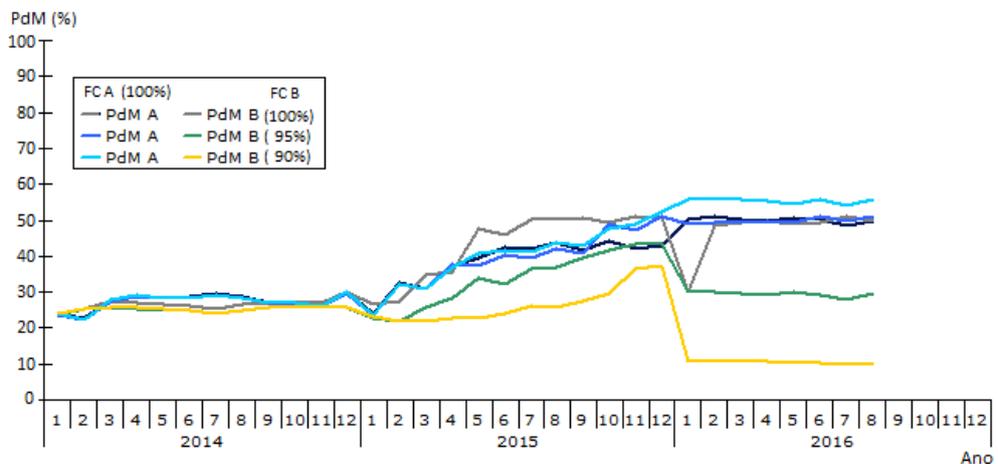
Quadro 17 - Análise de Sensibilidade do Fator de Cobertura.

FC A	FC B	PdM A (%)	PdM B (%)
1,00	1,00	49,8	50,1
1,00	0,95	51,3	29,6
1,00	0,90	55,7	10,6

Fonte: Autor.

A Figura 43 mostra o efeito da alteração da variável Fator de Cobertura.

Figura 43 - Análise de Sensibilidade do Fator de Cobertura.



Fonte: Autor.

Através dos resultados mostrados nos Quadro 13 a Quadro 17 pode-se concluir que o modelo atende às características de robustez. Com isso, o objetivo estabelecido na etapa 7 do processo de construção do modelo foi atingido, isto é, a robustez do modelo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou desenvolver um simulador de mercado para auxiliar os agentes comercializadores de energia na tomada de decisão em seu ambiente de negócios. Como apresentado ao longo deste trabalho, a constante atualização da legislação do setor elétrico e o aumento do número de consumidores no ACL contribuem ao desenvolvimento de um ambiente dinâmico, que necessita de ferramentas mais flexíveis e ágeis para sua análise.

### 6.1 CONCLUSÕES

A análise das simulações de mercado realizadas destaca alguns aspectos relevantes no que concerne ao planejamento estratégico de duas empresas de comercialização de energia. A técnica de análise e modelagem de Dinâmica de Sistemas apresenta-se como uma ferramenta adequada e compatível com a necessidade de implementar soluções de caráter técnico, gerencial e econômico, onde as relações causa-efeito realimentadas conferem dinâmica ao sistema. Além disso, quando utilizada em conjunto com a Teoria dos Jogos permitiu reproduzir os fatores da tomada de decisão dos agentes de mercado em um ambiente de competição.

Os resultados obtidos mostram que quando duas empresas estabelecem metas de participação de mercado semelhantes e que não comprometem a capacidade uma da outra de atingir suas metas, a tendência é de as empresas praticarem preços muito próximos. Se, no entanto, uma das empresas estiver aumentando sua BdC muito rapidamente, comprometendo a capacidade da concorrente de atingir sua meta, ocorre guerra de preços.

A aplicação realizada confirma a necessidade de aprimorar as técnicas de projeção de demanda e projeção de preço da energia, uma vez que esses fatores são relevantes para o sucesso no cumprimento das metas de PdM. As análises de sensibilidade e de políticas empresariais permitem concluir que o modelo elaborado é consistente e robusto.

### 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se o aprimoramento do modelo computacional adicionando outras empresas no modelo e a implementação de outras variáveis que podem influenciar a decisão do consumidor, como, por exemplo, as estratégias de *marketing* de cada empresa. Além disso, um mecanismo de projeção do preço executado no próprio simulador, permite assim que a variável BRIX deixe de ser exógena ao modelo.

## REFERÊNCIAS

ABRACEEL. **Quem pode ser Consumidor Livre | ABRACEEL**. Disponível em: <[http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes/consumidor\\_livre.asp](http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes/consumidor_livre.asp)>. Acesso em: 14 mar. 2016.

ALFRED D. CHANDLER JR. **Strategy and Structure: Chapters in the History of the American Industrial Enterprise**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1962.

ANEEL. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição : Consumidores, Consumo, Receita e Tarifa Média – Região, Empresa e Classe de Consumo**. Disponível em: <[http://relatorios.aneel.gov.br/\\_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSAMPRegiaoEmp.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAllItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1](http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSAMPRegiaoEmp.xlsx&Source=http%3A%2F%2Frelatorios%2Eaneel%2Egov%2Ebr%2FRelatoriosSAS%2FForms%2FAllItems%2Easpx&DefaultItemOpen=1)>. Acesso em: 3 out. 2016.

ANSOFF, H. I. **Estratégia Empresarial**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

BASS, F. M. A New Product Growth Model for Model Consumer Durables. **Management Science**, v. 15, n. 5, p. 215–227, 1969.

BIERMAN, H. S.; FERNANDEZ, L. F. **Game theory with economic applications**. Addison-Wesley, 1998.

BORDIN, G. **Um modelo para estudos da demanda de Energia elétrica em ambiente Competitivo**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2000.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8987compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987compilada.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9074cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <[www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.648, de 26 de agosto de 1998. Autoriza o Poder Executivo a promover a reestruturação da Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS e de suas subsidiárias e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9648cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9648cons.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.433, de 24 de abril de 2002. Dispõe sobre a autorização para a criação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica - MAE, pessoa jurídica de direito privado, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10433.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

BRIX. **Curva Futura**. Disponível em:

<[https://www.brix.com.br/publicdocs/brix/data\\_files/FW\\_Curve.xls](https://www.brix.com.br/publicdocs/brix/data_files/FW_Curve.xls)>. Acesso em: 9 nov. 2016.

CCEE. **infoLiquidez**, n.29, 2014.

CCEE. **Metodologia de Projeção do PLD**. Disponível em:

<[https://cee.org.br/cee/documentos/CCEE\\_346956](https://cee.org.br/cee/documentos/CCEE_346956)>.

CCEE. **Preços médios - Preço de Liquidação das Diferenças**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afLoop=697158311958188#%40%3F\\_afLoop%3D697158311958188%26\\_adf.ctrl-state%3D1afc8f3mx9\\_97](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=697158311958188#%40%3F_afLoop%3D697158311958188%26_adf.ctrl-state%3D1afc8f3mx9_97)>. Acesso em: 3 out. 2016a.

CCEE. **CCEE - Informações ao mercado**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_375862](https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_375862)>. Acesso em: 11 nov. 2016b.

CCEE. **CCEE - Preços médios mensais**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afLoop=153467393055964#%40%3F\\_afLoop%3D153467393055964%26\\_adf.ctrl-state%3Djnxq7d19q\\_103](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=153467393055964#%40%3F_afLoop%3D153467393055964%26_adf.ctrl-state%3Djnxq7d19q_103)>. Acesso em: 11 nov. 2016c.

CPFL. **Quem pode ser um Consumidor Livre**. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/unidades-de-negocios/comercializacao/cpfl-brasil/mercado-livre/Paginas/quem-pode-participar.aspx>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

EPE. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/acessoainformacao/Paginas/perguntasfrequentas.aspx>>. Acesso em: 14 set. 2016.

FLOOD, M. M.; DRESHER, M. **Some Experimental Games Management Science**. Santa Monica, CA: RAND, 1958.

FORD, A. (FREDERICK A. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems**. Island Press, 1999.

GUIMARÃES, F. O. B. **Metodologia e modelo para mensurar o risco de estratégias de contratação de agentes de distribuição**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Curitiba, 2011.

KOTLER, P. **Administração de marketing**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1998.

LEMKE, C. E.; HOWSON, J. T. Equilibrium Points of Bimatrix Games. **Source Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 12, n. 2, p. 413–423, 1964.

MERCADO LIVRE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Quem pode migrar para o Mercado Livre de Energia?** Disponível em: <<http://www.mercadolivredeenergia.com.br/>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

NASH, J. Non-Cooperative Games. **The Annals of Mathematics**, v. 54, n. 2, p. 286–295, 1951.

NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 36, n. 1, p. 48–49, 1950.

OHMAE, K. Getting Back to Strategy. **Harvard Business Review**, 1988.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **ONS - Institucional**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/institucional\\_linguas/relacionamentos.aspx](http://www.ons.org.br/institucional_linguas/relacionamentos.aspx)>. Acesso em: 5 set. 2016.

OSBORNE, M. J.; RUBINSTEIN, A. **A Course in Game Theory**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1994.

PORTAL PCH. **PLD - Preço de liquidação das diferenças**. Disponível em: <<http://www.portalpch.com.br/96-saiba-mais/111-pld-preco-de-liquidacao-das-diferencas.html>>. Acesso em: 7 out. 2016.

PORTER, M. E. **Vantagem competitiva : criando e sustentando um desempenho superior**. 21. ed. Rio de Janeiro : Campus, 1989.

POWERSIM SOFTWARE AS. **Powersim Studio 2003 User's Guide**. Dreggen - Norway.

**Powersim Studio**. BergenPowersim Software free AS, 2016. Disponível em: <<http://www.powersim.com>>

PRITCHARD, D. **Game Theory and Algorithms \* Lecture 6: The Lemke-Howson Algorithm**. Disponível em: <<http://ints.io/daveagp/gta/lecture6.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

RASOULI, M. **A Game-Theoretic Frame Work for Studying Dynamics of Multi Decision-maker Systems**. Proceedings of the 28th International Conference of the System Dynamics Society. **Anais...2010** Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/papers/P1071.pdf>>

SANDERSON, C.; CURTIN, R. Armadillo: a template-based C++ library for linear algebra. **Journal of Open Source Software**, v. 1, p. 26, 2016.

SCHUTZE, A. M. **A Demanda de Energia Elétrica no Brasil**. Tese (Doutorada), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Economia, Rio de Janeiro, 2015.

SHOHAM, Y.; LEYTON-BROWN, K. **Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations**. New York, USA: Cambridge University Press, 2008.

VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. **Theory of games and economic behavior**. Princeton: Princeton University Press, 2007.

## APÊNDICE A – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO POWERSIM STUDIO

O *software* Powersim Studio 10 possui quatro métodos numéricos de integração, o método de Euler de primeira ordem e o método de Runge-Kutta de segunda, terceira e quarta ordens (POWERSIM SOFTWARE AS, 2003). Segundo a empresa desenvolvedora do programa, alguns erros nos resultados de simulações podem estar associados com a configuração inadequada dos parâmetros de integração por isso estes métodos são brevemente descritos de forma aplicada a Dinâmica de Sistemas.

O método de Euler calcula os valores iniciais das variáveis de nível e das taxas. Depois utiliza as taxas para atualizar os valores dos níveis, depois os níveis atualizam a taxa e assim por diante. Esse método assume que as taxas são constantes a cada passo da integração.

Sendo  $L_t$  o valor do nível  $L$  no tempo  $t$  e  $F(L_t, t)$  o valor da taxa que entra ou sai do nível, então o algoritmo de integração pode ser descrito pelo Quadro A.1.

Quadro A.1 - Algoritmo de Integração de Euler do Powersim.

- 1: Calcular a taxa em  $t = T$
- 2:  $Taxa = F(L_T, T)$
- 3: Calcular o valor do Nível quando  $t = T + dt$  utilizando o valor corrente do nível e a Taxa do passo 2
- 4:  $Nível_{T+dt} = Nível_T + dt \cdot Taxa$
- 5: Repetir até a conclusão da simulação

Fonte: Adaptado de (POWERSIM SOFTWARE AS, 2003).

O método anterior, devido a problemas computacionais, faz o erro crescer ou até mesmo a solução divergir quando se diminui o passo. Uma solução para o problema dentro do ambiente de simulação é utilizar o método de Runge-Kutta. Esse método realiza múltiplas derivadas no mesmo passo sendo assim mais preciso que o método de Euler (POWERSIM SOFTWARE AS, 2003). Utilizando a mesma notação anterior, então o algoritmo de integração pode ser descrito pelo Quadro A.2.

Quadro A.2 - Algoritmo de Integração de Runge-Kutta de Segunda Ordem do Powersim

- 1: Calcular a taxa em dois pontos no intervalo de  $T$  a  $T + dt$
- 2:  $Taxa1 = dt \cdot F(L_T, T)$
- 3:  $Taxa2 = dt \cdot F(L_T + Taxa1, T + 3/4 \cdot dt)$
- 3: Calcular o valor do Nível quando  $t = T + dt$  utilizando uma média ponderada das Taxas 1 e 2
- 4:  $Nível_{T+dt} = Nível_T + 1/3 \cdot Taxa1 + 2/3 \cdot Taxa2$
- 5: Repetir até a conclusão da simulação

Fonte: Adaptado de (POWERSIM SOFTWARE AS, 2003).

Os métodos de ordem mais alta de Runge-Kutta seguem uma formulação semelhante, aumentando o número de derivadas calculadas em cada passo e o valor dos pesos dados a cada uma delas no cálculo da variável de nível. Neste trabalho utilizou-se o método de Runge-Kutta de segunda ordem devido a necessidade de precisão e agilidade no tempo de simulação.

## APÊNDICE B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COMPLEMENTAR

Uma vez que o modelo deste projeto trata de duas empresas competindo em um mercado dinâmico, a demanda de mercado é uma variável significativa. Para não comprometer a análise das demais variáveis, utilizou-se uma base de dados artificial composta sessenta e oito consumidores com demandas idênticas de 100MWmed ao mês. Nenhuma das empresas possui clientes na sua carteira inicial.

Os parâmetros definidos no Quadro do foram mantidos constantes para as duas empresas durante as simulações, salvo as alterações descritas nas tabelas de sensibilidade para cada variável.

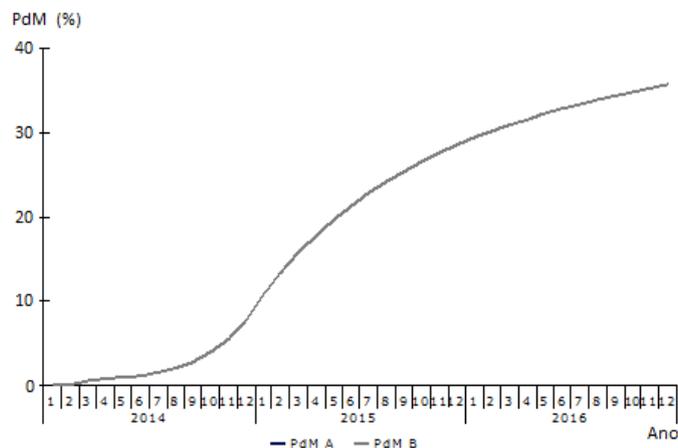
Quadro B.1 - Parâmetros de Referência

Portfólio inicial de energia = 100 MWmed	Fator de cobertura = 1
Elasticidade da demanda = 1,2 R\$/ MWh	Margem bruta inicial = 35%
Reinvestimento em energia = 20%	Objetivo de PdM = 50%

Fonte: Autor.

A simulação com os parâmetros de referência representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que até o final de 2014 fator que limita o crescimento da participação de mercado é a sua capacidade de oferta, uma vez que o seu caixa limita os investimentos em energia. Ao final deste período as duas empresas ofertam volumes de energia significativos dentro do mercado, ou seja, a curva de Preço contra Demanda começa a afetar o rendimento máximo, inicia-se assim o período de competição. Como as duas empresas tem os mesmos objetivos e estratégias para atingi-los, elas se comportam da mesma forma, praticando preços semelhantes. O resultado é que nenhuma delas consegue ultrapassar a PdM de 36%.

Figura 44 - Referência para Análise de Sensibilidade em Mercado Coeso



Fonte: Autor.

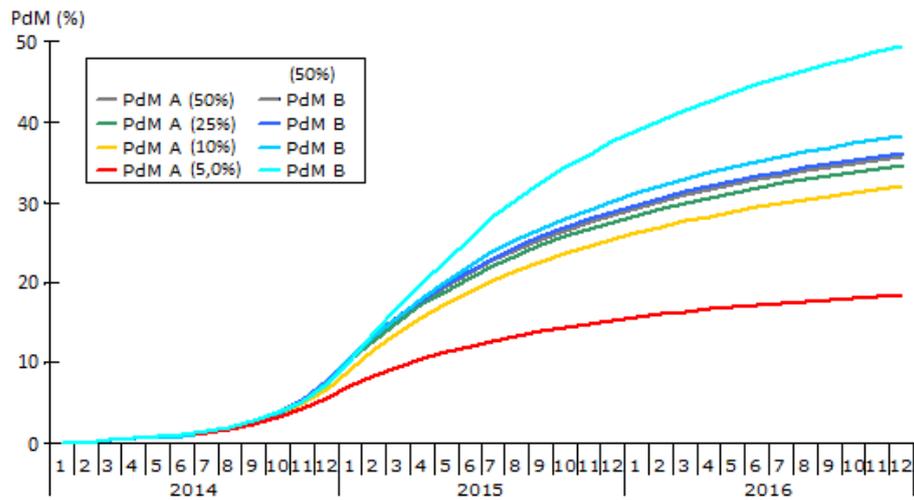
A análise de sensibilidade da variável Meta de PdM foi realizada mantendo uma das variáveis fixa em 50% e a outra reduzida do valor de referência conforme o Quadro .

Quadro B.2 - Análise de Sensibilidade das Meta de PdM

Meta PdM A (%)	Meta PdM B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
50	50	35,64	35,64
50	25	38,61	33,39
50	10	41,61	30,69
50	5,0	50,43	19,05

Fonte: Autor.

Figura 45 - Análise de Sensibilidade - Meta de PdM em Mercado Coeso



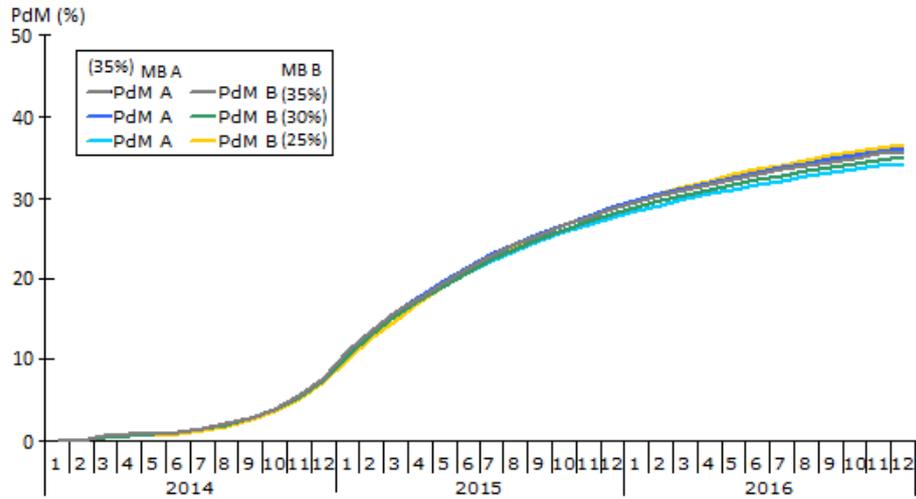
Fonte: Autor.

Quadro B.3 - Análise de Sensibilidade da Margem Bruta Inicial

MB Inicial A (%)	MB Inicial B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
35	35	35,64	35,64
35	30	35,28	36,43
35	25	34,34	37,56

Fonte: Autor.

Figura 46 - Análise de Sensibilidade - MB em Mercado Coeso



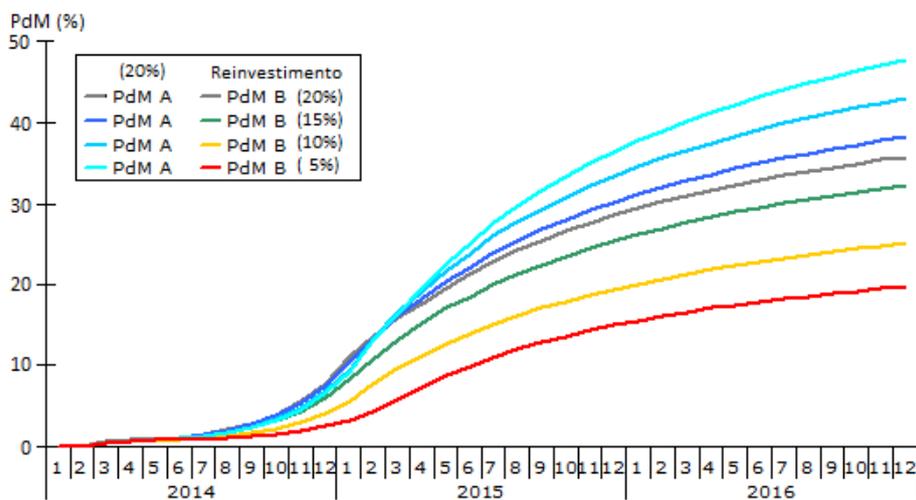
Fonte: Autor.

Quadro B.4 - Análise de Sensibilidade Reinvestimento

Reinvestimento A (%)	Reinvestimento B (%)	PdM A (%)	PdM B (%)
20	20	35,64	35,64
20	15	38,84	33,1
20	10	44,56	26,30
20	5	50,32	21,55

Fonte: produzido pelo autor.

Figura 47 - Análise de Sensibilidade - Reinvestimento em Mercado Coeso



Fonte: Autor.

Quando as empresas operam em um mercado no qual o número de consumidores contratando é constante o crescimento das empresas fica limitado, resultando em curvas de *market share* do tipo logística.