

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

ETRI BANDEIRA JUNIOR

**GERAÇÃO EÓLICA:
ANÁLISE DE INVESTIMENTOS**

Porto Alegre
2010

ETRI BANDEIRA JUNIOR

**GERAÇÃO EÓLICA:
ANÁLISE DE INVESTIMENTOS**

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

Área de concentração: Geração de Energia Elétrica.

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Gladis Bordin

Porto Alegre

2010

ETRI BANDEIRA JUNIOR

**GERAÇÃO EÓLICA:
ANÁLISE DE INVESTIMENTOS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientadora: _____

Prof^a. Dr^a. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Eng. Alexandre Salazar, BRASKEM S/A

Graduado pela Universidade Luterana do Brasil – Canoas, Brasil

Msc. Julio Vitor Kunzler Junior, CENTRALO ENERGIA

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o apoio e incentivo dado ao longo dos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos por todo o apoio e compreensão.

À Professora Gladis Bordin, pela a orientação, incentivo e apoio durante a realização do trabalho.

Ao meu Líder de Estágio, Alexandre Salazar, pelo incentivo e pelo grande auxílio na escolha do tema do trabalho.

RESUMO

Este trabalho faz uma revisão da situação atual dos sistemas de geração de energia eólica no Brasil e no mundo. Aspectos como o histórico, as tecnologias, os impactos ambientais, programas governamentais de incentivo e oportunidades no setor são abordados. Em seguida, é apresentada a técnica de modelagem denominada Dinâmica de Sistemas, desenvolvida por Jay W. Forrester, a qual emprega conceitos da engenharia de controle e da teoria geral dos sistemas. Finalmente, é proposto um modelo teórico baseado em Dinâmica de Sistemas para o estudo da viabilidade de investimento em um parque de geração eólica, visando o suprimento de parte da demanda elétrica de uma indústria autoprodutora de energia elétrica. Este modelo é validado a partir de um estudo de caso, o qual comprova a viabilidade de tal investimento, a partir da análise de questões como confiabilidade, sustentabilidade e custos.

Palavras-chave: Energia Eólica. Geração de Energia Elétrica. Dinâmica de Sistemas. Análise de Investimentos.

ABSTRACT

This paper reviews the current status of the wind power generation in Brazil and worldwide. Aspects such as history, technology, environmental impacts, government programs of incentives and opportunities in the sector are addressed. Next, is presented the modeling technique called System Dynamics, developed by Jay W. Forrester, which employs the concepts of control engineering and general systems theory. Finally, is proposed a theoretical model based on system dynamics to study the feasibility of investment in a wind farm in order to supply part of the electric demand of an industry self-producer of electricity. This model is validated with a case study, which demonstrates the viability of such investment, analyzing issues such as reliability, sustainability and cost.

Keywords: Wind Energy. Power Generation. System Dynamics. Investment Analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	GERAÇÃO EÓLICA	14
2.1	HISTÓRICO	14
2.2	GERAÇÃO EÓLICA NO MUNDO	15
2.3	GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL	17
2.4	TECNOLOGIA EÓLICA	21
2.4.1	Potência Extraída por uma Turbina Eólica	22
2.4.2	Componentes de um Sistema Eólico	23
2.4.3	Aplicações dos Sistemas Eólicos	24
2.4.4	Impactos Ambientais	25
2.5	CONSIDERAÇÕES GERAIS	26
3	DINÂMICA DE SISTEMAS	28
3.1	DIAGRAMAS DE ESTOQUE E FLUXO (DEF)	30
3.2	DIAGRAMAS DE LAÇO CAUSAL (DLC).....	32
4	MODELAGEM.....	35
4.1	MODELO DE DYKES & STERMAN	35
4.2	MODELO PROPOSTO	37
5	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	39
5.1	UNIDADE DE INSUMOS BÁSICOS - RS (UNIB-RS).....	39
5.1.1	Sistema Elétrico da UNIB-RS.....	41
5.1.2	Demanda Elétrica da UNIB-RS	43
5.2	LAÇO CAUSAL DE CONFIABILIDADE	45
5.2.1	Alteração na Divisão de Cargas entre as Fontes de Geração	47
5.2.2	Disponibilidade de Combustíveis	47
5.2.3	Atuação da Operação	48
5.2.4	Considerações Gerais	48
5.3	LAÇO CAUSAL DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	49
5.3.1	Conceito de Desenvolvimento Sustentável.....	50
5.3.2	Visão 2020 da BRASKEM S/A	51
5.3.3	Considerações Gerais	55
5.4	LAÇOS CAUSAIS DE CUSTO	56
5.5	LAÇO CAUSAL DE CONHECIMENTO.....	59
6	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS	62

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Evolução da instalação de parques eólicos no Mundo.....	15
Figura 2 Países com as maiores capacidades eólicas instaladas	16
Figura 3 Capacidade de geração instalada no Brasil.	17
Figura 4 Usinas do PROINFA.....	20
Figura 5 Evolução dos aerogeradores.....	22
Figura 6 Componentes de um aerogerador.....	24
Figura 7 Diagrama de Estoque e Fluxo.	31
Figura 8 Exemplo de Diagrama de Laço Causal.	33
Figura 9 Diagrama de Laço Causal com realimentação negativa.	34
Figura 10 DLC proposto por Dykes e Sterman.	36
Figura 11 Modelo proposto para a análise de investimentos no setor eólico.....	37
Figura 12 Cadeia produtiva de insumos básicos.	40
Figura 13 Alimentação elétrica do Pólo Petroquímico do Sul	41
Figura 14 Turbogenerador a vapor.....	42
Figura 15 Turbogenerador a gás.....	43
Figura 16 Evolução da carga elétrica da UNIB-RS.....	44
Figura 17 Laço Causal de Confiabilidade.	45
Figura 18 DLC auxiliar de Confiabilidade.	46
Figura 19 Laço Causal de Desenvolvimento Sustentável.	49
Figura 20 Pilares da Sustentabilidade.....	50
Figura 21 Desbalanceamento entre os pilares da Sustentabilidade.	51
Figura 22 Simulações com o software ACOMB5.....	54
Figura 23 Eficiência do Ciclo Rankine da UNIB-RS (fechado).	55
Figura 24 Eficiência do Ciclo Brayton da UNIB-RS (fechado).....	55
Figura 25 Laços Causais de Custo.....	56
Figura 26 Distribuição do Parque Térmico por faixa de CVU e subsistema.	57
Figura 27 Laço Causal de Conhecimento.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Desenvolvimento tecnológico das turbinas de médio porte	14
Tabela 2 Níveis de vapor da UNIB-RS	40
Tabela 3 Macro objetivos da Visão 2020.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS

AL: Alimentador

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CTA: Centro Técnico Aeroespacial

CCVE: Contratos de Compra e Venda de Energia

CEEE: Companhia Estadual de Energia Elétrica

CELESC: Centrais Elétricas de Santa Catarina

CELPA: Centrais Elétricas do Pará

CELPE: Companhia de Eletricidade de Pernambuco

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais

CHESF: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

COELBA: Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia

COELCE: Companhia de Eletricidade do Estado do Ceará

COPEL: Companhia Paranaense de Energia

CVU: Custo Variável Unitário

DEF: Diagrama de Estoque e Fluxo

DLC: Diagrama de Laço Causal

DS: Dinâmica de Sistemas

ELETROBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras S/A

EWEA: European Wind Energy Association

EV: Eteno Verde

GEE: Gases de Efeito Estufa

MIT: Massachusetts Institute of Technology

MME: Ministério de Minas e Energia

NIMBY: “Not in my Backyard”

OLE1: Olefinas 1

OLE2: Olefinas 2

PCH: Pequena Central Hidrelétrica

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

SE: Subestação

SIN: Sistema Interligado Nacional

TGG: Turbogenerador a Gás

TGV: Turbogenerador a Vapor

TR: Transformador

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

UFPB: Universidade Federal da Paraíba

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIB: Unidade de Insumos Básicos

UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas

VA: Vapor de Alta Pressão

VB: Vapor de Baixa Pressão

VM: Vapor de Média Pressão

VS: Vapor de Super Alta Pressão

WWEA: World Wind Energy Association

1 INTRODUÇÃO

A recente conscientização mundial a respeito da possível escassez dos recursos fósseis e sobre a necessidade de redução das emissões dos gases de efeito estufa, impulsionaram um grande incentivo à utilização de energias renováveis. Até há pouco tempo, o homem explorava os recursos naturais sem preocupar-se com as conseqüências deste fato. A natureza, entretanto, passou a dar vestígios de seu enfraquecimento e fatores como o aquecimento global, por exemplo, direcionaram a atenção mundial em busca de um desenvolvimento sustentável.

Esta mudança, contudo, é complexa. Atualmente, somente 12,7% da energia elétrica gerada no mundo provêm de fontes renováveis. O Brasil é um país privilegiado, com 47,3% de sua matriz energética proveniente deste tipo de fonte. Porém, manter este índice está se tornando uma tarefa cada vez mais difícil. O setor elétrico brasileiro utiliza a sinergia hidro-térmica, a fim de garantir a modicidade tarifária aliada à segurança no suprimento. A complexidade do Licenciamento Ambiental das hidroelétricas tem grande influência na escassa oferta de concessões dessas usinas pelo Governo. Além disso, as vantagens de custo e confiabilidade oferecidos pelas termoeletricas a carvão e óleo, quando comparadas às fontes complementares (biomassa, eólica, PCHs), têm aumentado a participação das fontes não-renováveis na matriz energética brasileira.

O presente trabalho apresenta uma revisão da situação atual dos sistemas de energia eólica brasileiros, as características técnicas básicas deste tipo de tecnologia e os programas governamentais de incentivo às fontes alternativas. Com base nesta revisão, é proposto um modelo teórico para auxílio na análise da viabilidade de investimento em um parque de geração eólica, visando o suprimento de parte da demanda elétrica de uma indústria autoprodutora. Para esta análise, é empregada a técnica de Dinâmica de Sistemas, cujos conceitos são apresentados ao longo deste trabalho.

O trabalho está estruturado de forma a apresentar os conceitos do tema abordado e das ferramentas utilizadas, para posteriormente apresentar as contribuições desenvolvidas. O Capítulo 2 apresenta um panorama geral sobre a geração de energia eólica no Brasil e no mundo, tecnologias, impactos ambientais e oportunidades no setor. O Capítulo 3 traz uma introdução à técnica de Dinâmica de Sistemas e apresenta sua idéia básica, seus elementos e tipos de diagramação. No

Capítulo 4 é apresentado um modelo, baseado em dinâmica de sistemas, o qual foi utilizado como base para a construção do modelo aqui proposto, o qual também é apresentado neste mesmo capítulo. No Capítulo 5, são analisados detalhadamente os laços causais os quais compõem o modelo proposto no Capítulo 4. Finalizando o trabalho, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do projeto e os tópicos para pesquisa.

2 GERAÇÃO EÓLICA

2.1 HISTÓRICO

Embora não existam documentos comprobatórios, acredita-se que, há pelo menos 5.000 anos atrás, os egípcios foram os primeiros a utilizarem a força dos ventos para movimentarem seus barcos a vela. Já os moinhos de vento surgiram no século VII, na Pérsia, e eram utilizados para a moagem de grãos (GRAHAM, 1999).

A tecnologia foi levada à Europa pelos soldados vindos das Cruzadas e, no início da Idade Contemporânea, a energia eólica já era muito utilizada pelos navegadores e para a drenagem de terras, principalmente na Holanda (FORTUNA, 2010).

A geração de energia elétrica através das forças provenientes dos ventos, entretanto, apenas tornou-se viável, econômica e estrategicamente, durante a crise do petróleo na década de 70. A necessidade de muitos países em encontrar uma alternativa aos combustíveis fósseis impulsionou grandes esforços para a evolução dos sistemas já existentes, reduzindo o custo e aumentando a faixa de operação (TOLMASQUIM, 2003).

A Tabela 1 apresenta os resultados destes esforços iniciados no final dos anos 70, mostrando a evolução das turbinas de médio porte em áreas onde elas conseguem extrair de 35% a 40% da energia contida nos ventos.

Período	Diâmetro do Rotor (m)	Área Varrida pelo Rotor (m ²)	Capacidade Instalada (kW)	Energia nominal anual para velocidade de 7m/s (MWh)
Início - anos 80	12,5	125	50	150
Meados - anos 80	18	250	100	300
Final - anos 80	25	500	200	600
Início - anos 90	35	1.000	400	1.200
Meados - anos 90	40	1.250	500	1.500

Tabela 1 Desenvolvimento Tecnológico das Turbinas de Médio Porte.

Fonte: retirado de GIPE, 1995.

O litoral brasileiro apresenta grande potencial eólico, entretanto, os investimentos neste setor levaram muito tempo para tornarem-se significativos. O primeiro aerogerador de grande porte foi instalado apenas em 1992, em Fernando de Noronha, através de uma parceria entre a CELPE e a Folkcenter – Dinamarca. Com 75 kW e 13 m de diâmetro de rotor, o gerador foi interligado ao sistema de base diesel-elétrica que atende a ilha.

2.2 GERAÇÃO EÓLICA NO MUNDO

De acordo com dados da “World Wind Energy Association” (WWEA), entre os anos de 2001 e 2009, houve um aumento superior a 550% na capacidade de energia eólica total instalada. Só o ano de 2009, quando comparado com 2008, apresentou um aumento de 31,7%, a maior taxa de crescimento desde 2001, correspondendo a um acréscimo de quase 40.000 MW. Através da Figura 1, pode-se observar que a capacidade total instalada tem duplicado a cada três anos.



Figura 1 Evolução da Instalação de Parques Eólicos no Mundo.

Fonte: retirado de WWEA, 2010.

Os dados da WWEA mostram que atualmente o setor de energia eólica emprega, em todo o mundo, cerca de 550.000 pessoas. Além disso, prevê-se que até 2012 o número de empregos relacionados ao setor ultrapasse a marca de um milhão.

A liderança mundial em potência instalada está continuamente sendo alterada. Até 2007, a Alemanha era considerada o país líder em geração eólica no mundo. No entanto, nos anos seguintes, foi ultrapassada pelos Estados Unidos, os quais realizaram grandes investimentos nesse setor nos últimos anos. Em 2009, contudo, a China entrou nessa disputa. Com 13.800 MW instalados em apenas um ano, os chineses mais do que duplicaram seus parques eólicos, ultrapassando a Alemanha e assumindo a segunda posição.



Figura 2 Países com as maiores capacidades eólicas instaladas.

Fonte: retirado de WWEA, 2010.

O grande investimento chinês colocou a Ásia na posição de continente com o maior percentual de investimentos no setor eólico, no ano de 2009 (40,4%). Em seguida estão a América do Norte (28,4%) e a Europa (27,3%). A América Latina, apesar de não possuir um grande investimento quando comparada aos outros continentes, duplicou sua potência instalada. Os protagonistas deste crescimento são países como México e o Brasil.

No ritmo atual de investimentos, pode-se prever uma capacidade mundial total instalada de 1.900.000 MW em 2020.

Para efeitos comparativos, de acordo com a Agência Nacional de Energia Atômica, a quota de energia nuclear, em 2009, sofreu um novo decréscimo. Segundo a agência, o número de plantas de

geração nuclear reduziu em uma unidade nesse ano. Isso mostra o grande contraste entre o crescimento no número de parques eólicos e o decréscimo de investimentos em outras fontes.

Ao contrário do que poderia se esperar a crise econômica mundial não resultou em impactos negativos para o setor. Pelo contrário, muitos governos aceleraram os investimentos em energias renováveis, buscando uma saída para a crise financeira e energética. Nesse contexto, as tarifas diferenciadas para o uso de energias renováveis tiveram um papel importante. Estes fatores tornaram a tecnologia eólica um investimento de baixo risco, não só para os investidores, desde que se tenham políticas corretas de incentivo.

2.3 GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL

Conforme se pode observar na Figura 3, o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. As usinas hidroelétricas, devido principalmente ao seu baixo custo, são utilizadas como base de geração e as demais fontes (eólica, carvão, biomassa, óleo, nuclear, solar) são utilizadas de forma complementar.

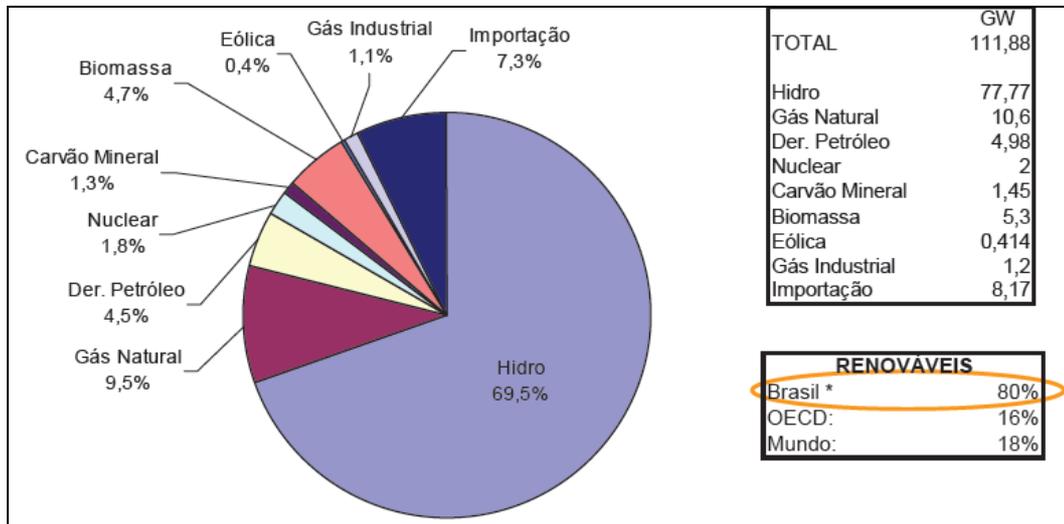


Figura 3 Capacidade de Geração Instalada no Brasil.

Fonte: retirado de ANEEL, 2009.

Outro aspecto que se deve observar quando avalia-se a matriz energética de um país, consiste na emissão de gases de efeito estufa (GEE's). O Brasil é o oitavo maior emissor de GEEs em todo o mundo, superando a média mundial em quase 400%. Os grandes responsáveis por esses números, todavia, não são as centrais termoelétricas, mas sim os desmatamentos que ocorrem no país. Apenas 1,8% das emissões de CO₂ que ocorreram no Brasil, em 2005, foram provenientes de processos de geração de energia elétrica.

Com uma matriz energética tão limpa e com um grande potencial hídrico ainda a ser explorado, o país demorou a investir de maneira significativa nas energias alternativas. Assim, a iniciativa em produção de energia eólica no Brasil ficou dispersa em ações isoladas de universidades, centros de pesquisas e concessionárias, com uma produção científica e tecnológica que somente ganhou destaque a partir do final da década de 70 e ao longo da década de 80 (TOLMASQUIM, 2003).

Entre os grupos que desenvolveram projetos nesta área, destacam-se o Centro de Tecnologia Aeroespacial (CTA), a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Além disso, grandes inventários de geração eólica foram iniciados pelas seguintes concessionárias: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Na década de 90, outras concessionárias, notadamente a Companhia de Eletricidade do Estado do Ceará (COELCE), a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), a Centrais Elétricas do Pará (CELPA) e a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), iniciaram medições prospectivas (WOBEN ENERCON, 2002).

Em 2004, através do Decreto nº 5.025, foi instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Seu objetivo consiste em aumentar a participação de empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Através do PROINFA, o Ministério de Minas e Energia (MME) busca uma diversificação da Matriz Energética do país. Além disso, a geração distribuída aumenta a segurança do abastecimento da energia elétrica, economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nesses sistemas. Por fim, com o incentivo às fontes alternativas as características e potencialidades regionais e locais são valorizadas.

A definição das diretrizes, o planejamento do Programa e a definição do valor econômico de cada fonte foram feitos pelo MME. O papel de agente executora, com a celebração de contratos de compra e venda de energia (CCVE), coube à Eletrobrás.

Assim, foi estabelecido que o valor pago pela energia elétrica adquirida, além dos custos administrativos, financeiros e encargos tributários incorridos pela Eletrobrás na contratação desses empreendimentos, fossem rateados entre todas as classes de consumidores finais atendidas pelo SIN, com exceção dos consumidores classificados na Subclasse Residencial Baixa Renda (consumo igual ou inferior a 80 kWh/mês).

Foi prevista pelo PROINFA, a instalação de 144 usinas, totalizando uma capacidade de geração instalada igual a 3.299,40 MW. Destes, 1.422,93 MW seriam gerados através de 54 usinas eólicas, conforme pode ser observado na Figura 4. A contratação de toda essa energia teria garantia por 20 anos pela Eletrobrás.

REGIÃO	Fonte	Operação comercial		Concluídas aguardando regularização pelo Proinfa	Em construção	Não iniciada construção			Sub judice/ em rescisão contratual	TOTAL contratado
						Com EPC	Sem EPC	Total		
 NORTE	PCH	3	50,0%		3					6
	BIOMASSA	46,80	45,8%		55,40					102,20
	EÓLICA									
	TOTAL	3	50,0%	0	3	0	0	0	0	6
		46,80	45,8%	0,00	55,40	0,00	0,00	0,00	0,00	102,20
 NORDESTE	PCH	3	100,0%							3
	BIOMASSA	41,80	100,0%							41,80
	EÓLICA	5	83,3%						1	6
		89,20	74,8%						30,00	119,20
	7	19,4%	12	12	4	1	5		36	
	152,95	19,0%	73,43	413,50	160,30	5,40	165,70		805,58	
TOTAL	15	33,3%	12	12	4	1	5	1	45	
	283,95	29,4%	73,43	413,50	160,30	5,40	165,70	30,00	966,58	
 CENTRO-OESTE	PCH	13	52,0%	2	10					25
	BIOMASSA	280,44	56,2%	47,10	171,40					498,94
	EÓLICA	2	33,3%						4	6
		54,52	42,3%						74,40	128,92
TOTAL	15	48,4%	2	10	0	0	0	4	31	
	334,96	53,3%	47,10	171,40	0,00	0,00	0,00	74,40	627,86	
 SUDESTE	PCH	8	53,3%	4	2				1	15
	BIOMASSA	161,00	56,5%	92,00	22,20				10,00	285,20
	EÓLICA	9	81,8%		1	1		1		11
		265,52	80,0%		36,00	30,50		30,50		332,02
				1			1		2	
				28,05		135,00	135,00		163,05	
TOTAL	17	60,7%	4	4	1	1	2	1	28	
	426,52	54,7%	92,00	86,25	30,50	135,00	165,50	10,00	780,27	
 SUL	PCH	12	85,7%	1			1	1		14
	BIOMASSA	236,90	90,0%	19,50			6,70	6,70		263,10
	EÓLICA	3	75,0%	1						4
		95,10	90,5%	10,00						105,10
	4	25,0%				11	1	12	16	
	159,00	35,0%			225,29	70,00	295,29		454,29	
TOTAL	19	55,9%	2	0	11	2	13	0	34	
	491,00	59,7%	29,50	0,00	225,29	76,70	301,99	0,00	822,49	

Figura 4 Usinas do PROINFA.

Fonte: retirado de ANEEL, 2010.

O PROINFA foi o primeiro grande passo para o desenvolvimento dos parques eólicos no Brasil. Até sua implantação, a capacidade de energia eólica instalada era de cerca de 22 MW, com destaque para os principais parques eólicos:

- 1 MW em Castelinho-MG (inaugurado em 1994);
- 5 MW em Taíba-CE (inaugurado em 1998);
- 10 MW em Prainha-CE (inaugurado em 1999);
- 2,5 MW em Palmas-PR (inaugurado em 1999);
- 0,25 MW em Fernando de Noronha-PE (inaugurado em 2000);
- 2,4 MW em Macuripe-CE (inaugurado em 2001) e
- 0,6 MW em Bom Jardim da Serra (inaugurado em 2002).

Em apenas 3 anos, como resultado do programa, essa capacidade instalada cresceu para 414 MW.

O índice de 60% de nacionalização dos empreendimentos foi estabelecido pelo Programa, com o objetivo de fomentar a indústria de base dessas fontes.

De acordo com a Lei nº 11.943, de 28 de maio de 2009, o prazo para o início de funcionamento desses empreendimentos encerra em 30 de dezembro de 2010. Apesar dessa lei, em setembro de 2010, seis anos depois da criação do programa, um relatório da ANEEL aponta 19 empreendimentos eólicos previstos pelo PROINFA os quais ainda não foram concluídos. Destas, nove obras possuem previsão de entrada em operação em 2011, totalizando uma capacidade de 315,5 MW. Os outros dez empreendimentos, os quais somam uma carga de 351,2 MW, possuem o que a Agência chama de “impedimentos para entrada em operação”, os quais consistem em problemas com documentação, licenciamento ambiental, localização ou empreendimentos com a obra ainda não iniciada.

Como o prazo da ANEEL para a conclusão das obras referentes ao PROINFA se encerra em dezembro de 2010, a não ser que se tenha uma nova resolução da Agência, as usinas as quais não tiverem suas obras concluídas até o prazo estabelecido, terão de buscar alternativas, como a participação em leilões de energia.

O preço máximo pago aos investidores responsáveis pelas usinas eólicas do PROINFA, reajustado no final de 2009, era de R\$277 por MWh. Contudo, nos últimos leilões de reserva de fontes alternativas, a tarifa média para os empreendimentos da fonte ficou em R\$130,86 por MWh. Pela primeira vez, em 2010, a tarifa média para as usinas eólicas ficou inferior a todas as tarifas de todas as outras energias alternativas.

2.4 TECNOLOGIA EÓLICA

A energia eólica para a geração de energia elétrica teve seu início no final do século XIX e, inicialmente, foi utilizada em sistemas de bombeamento de água e moagem de grãos.

Nos anos 90, devido aos vários programas de incentivo executados em diversos países, pesquisas e investimentos foram motivados no setor. Um número expressivo de fabricantes de turbinas

eólicas surgiu no mercado, melhorando a performance e diminuindo os custos das turbinas. A figura 5 apresenta a evolução da potência e das dimensões dos aerogeradores.

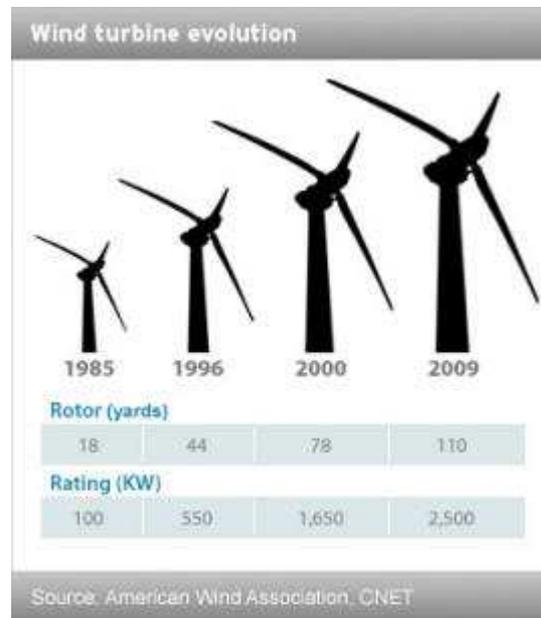


Figura 5 Evolução dos Aerogeradores.

Fonte: retirado de AWEA, 2010.

2.4.1 – Potência Extraída por uma Turbina Eólica

A potência extraída por uma turbina eólica é descrita pela seguinte equação:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \eta \cdot A \cdot V_i^3$$

Onde ρ é a massa específica do ar, c_p é o coeficiente de potência, η é a eficiência de conversão eletromecânica, A é a área do rotor e V_i é a velocidade frontal.

O coeficiente c_p consiste no valor de energia contida no fluxo de ar que pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica, sem serem consideradas as perdas aerodinâmicas do gerador. Em condições ideais, o valor máximo de c_p é de 0,593 (ou 59,30%) e é chamado de Coeficiente de Betz (DEWI, 1998).

O coeficiente de potência c_p de uma turbina eólica varia de acordo com a velocidade do vento. Esta variação deve-se ao fato das pás do rotor da turbina alterarem suas eficiências aerodinâmicas em função da variação da velocidade do vento incidente. O ponto máximo da curva c_p versus V_i

representa a máxima eficiência da turbina e é obtida em uma determinada velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2009).

Deve-se ainda considerar a redução de potência devida aos rendimentos dos demais equipamentos utilizados: gerador, transmissão, bomba, etc.

2.4.2 – Componentes de um Sistema Eólico

Basicamente, um sistema eólico é constituído pelos componentes listados e descritos a seguir:

- Rotor;
- Transmissão/Caixa Multiplicadora;
- Gerador elétrico;
- Mecanismo de controle e orientação e
- Torre.

A energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação do eixo do rotor. Essa energia mecânica é transmitida do rotor até o gerador através da caixa multiplicadora. Alguns geradores não possuem este sistema. Nestes, o rotor está no mesmo eixo do gerador. O gerador é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Através dos mecanismos de controle e orientação, é realizada a orientação do rotor, o controle de velocidade, o controle de carga, etc.

A torre, por sua vez, é responsável pela sustentação e posicionamento do rotor na altura conveniente.

Os principais componentes de um aerogerador podem ser observados na Figura 6.

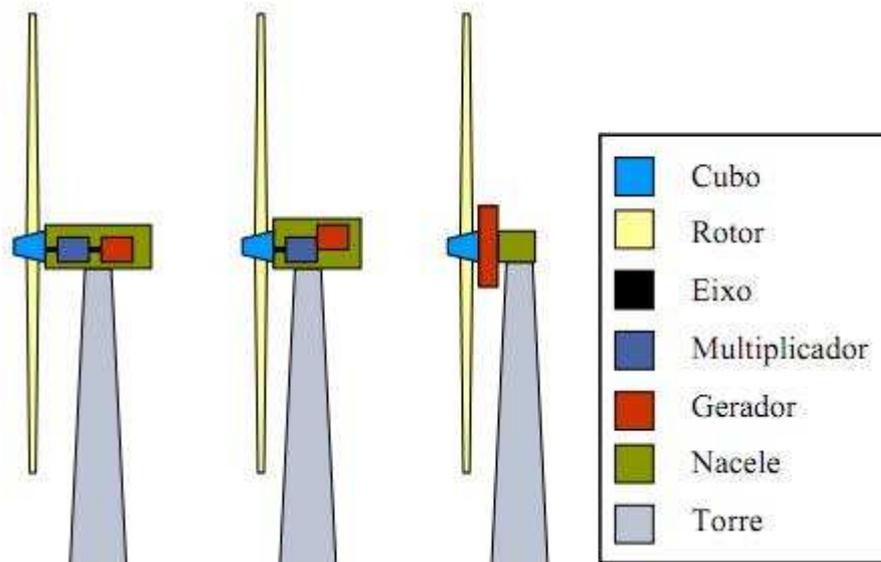


Figura 6 Componentes de um Aerogerador.

Fonte: retirado de CEPTEL, 2010.

2.4.3 – Aplicações dos sistemas eólicos

Os sistemas eólicos podem ser utilizados em três aplicações distintas: em sistemas isolados, híbridos e interligados, conforme será descrito a seguir.

Os sistemas isolados utilizam sistemas de armazenamento de energia. Em geral, são utilizados bancos de baterias, mas é comum o armazenamento na forma de energia gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Em sistemas de irrigação, onde toda a água é bombeada e diretamente consumida, não há a necessidade de armazenamento.

Nos sistemas os quais utilizam baterias, é necessário um dispositivo controlador de carga. Seu objetivo é evitar danos às baterias, provocados por sobrecargas ou grandes descargas.

Além do controlador de carga, também é necessária a utilização de um inversor de frequência. Seu objetivo é realizar a conexão das baterias com sistemas de corrente alternada.

Os sistemas híbridos são aqueles que possuem mais de uma fonte de geração de energia elétrica, podendo ela ser outra turbina eólica, geradores diesel, módulos fotovoltaicos, etc. Consistem em sistemas complexos, os quais necessitam de sistemas de controle para a otimização do uso de cada uma das fontes.

Geralmente, os sistemas híbridos são aplicados em sistemas de médio porte. Como trabalham em corrente alternada, também há a necessidade da utilização de inversores de frequência.

Nos sistemas interligados, não há a necessidade de dispositivos de armazenamento de energia. Toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Possuem as vantagens inerentes a sistemas de geração distribuída, como por exemplo redução de perdas, custo evitado com expansão da rede, entre outros. Necessita, porém, de sistemas de sincronização com a rede elétrica.

2.4.4 – Impactos Ambientais

De um modo geral, tanto pelo caráter não poluente, quanto pelo fato de o vento ser uma fonte inesgotável de energia, a energia eólica possui uma grande aceitação social. Todavia, como toda a forma de produção de energia elétrica, a energia eólica possui também impactos sócio-ambientais os quais devem ser considerados. Entre estes impactos citam-se:

- Utilização do terreno;
- Impacto visual;
- Emissão de ruídos;
- Colisão de aves;
- Interferências eletromagnéticas e
- Segurança.

De acordo com o CEPEL, uma usina eólica ocupa uma grande área, da ordem de 10MW/km². No entanto, o espaço de solo realmente ocupado é muito pequeno, da ordem de 5×10^{-6} % da área total da usina. Esta característica permite que a área seja utilizada para outros fins, como a pecuária e agricultura.

Para diminuir o impacto visual provocado pelas torres, é comum a pintura dos aerogeradores com as cores da paisagem. Contudo, há o desconforto causado pelas sombras em movimento e reflexões intermitentes geradas pelas pás. Para diminuir o efeito das reflexões, são utilizadas pinturas opacas.

Em relação ao ruído, em geral, recomenda-se que seja mantida uma distância mínima de 200 metros dos aerogeradores, correspondendo a ruídos inferiores a 40dB.

A interferência dos aerogeradores e parques eólicos sobre as aves é o único impacto da energia eólica sobre a fauna. Em parques localizados em zonas de migração de aves, observam-se mortes de pássaros causadas pelo choque com as pás das turbinas em movimento. Todavia, de acordo com uma pesquisa realizada pela “European Wind Energy Association” (EWEA), em 1998 na Holanda, as turbinas eólicas foram responsáveis por apenas 0,4% das mortes de pássaros. Para efeitos de comparação, 22,1% das mortes foram causadas por linhas de transmissão, 44,2% pelo tráfego e 33,2% pela caça.

Embora não causem interferências significativas, está provado que os aerogeradores podem interferir em sistemas de telecomunicações. Isso acontece devido à reflexão de ondas eletromagnéticas. Recomenda-se a realização de estudos mais detalhados quando o parque situa-se próximo de aeroportos ou sistemas de retransmissão. (CUSTÓDIO, 2009)

Em relação à segurança, os sistemas de geração eólica estão entre os sistemas de geração de energia elétrica mais seguros. Contudo, há alguns casos de pessoas feridas por pedaços partidos de pás, ou por pedaços soltos de gelo (CUSTÓDIO, 2009).

2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A geração eólica tem-se tornado uma alternativa cada vez mais competitiva para a expansão dos sistemas elétricos. Por tratar-se de uma das formas de geração de energia elétrica que menos trazem impactos para a natureza, a crescente busca por um desenvolvimento sustentável tem contribuído ainda mais para o crescimento desta tecnologia. Entretanto, por possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, o Brasil entrou tardiamente neste mercado. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) não atingiu a plenitude de seus objetivos, tendo como um dos motivos a escassa mão de obra especializada no país.

Indústrias de outros setores, as quais possuem geração própria, geralmente tendiam a buscar nas termoelétricas a alternativa para seu suprimento de energia elétrica. Neste novo cenário, no qual o custo da energia gerada pelos parques eólicos tornou-se competitiva e no qual há uma grande pressão

social a favor das tecnologias “limpas”, as usinas eólicas toraram-se uma alternativa viável. Apesar disso, a decisão por tais investimentos é muito complexa, envolvendo a análise de diversas variáveis, tanto quantitativas, quanto qualitativas.

O objetivo deste Projeto de Diplomação é propor um modelo teórico para auxiliar nesta tomada de decisão. Para isso, foi utilizada a ferramenta de Dinâmica de Sistemas, a qual será apresentada no próximo capítulo.

3 DINÂMICA DE SISTEMAS

Dinâmica de Sistemas (DS) consiste em uma técnica preconizada por Jay W. Forrester, do MIT (Massachusetts Institute of Technology), a qual visa à análise, modelagem e simulação de sistemas complexos e de seus comportamentos através do tempo. Seus conceitos básicos foram descritos por Forrester no livro *Industrial Dynamics* de 1961.

Nas representações por DS, métodos de engenharia de controle são utilizados permitindo que sistemas econômicos e sociais sejam representados visualmente através de equações algébricas e diferenciais, além de possibilitarem a visualização de seus comportamentos dinâmicos, através de métodos similares aos aplicados aos sistemas técnicos.

Um dos princípios da técnica é o de que os sistemas não devem ser divididos em partes ao serem analisados, visto que, fazendo isso, estamos ignorando conexões e interações de grande importância. A partir desta filosofia, a DS representa um avanço na análise de problemas, pois explica e modela os mecanismos de realimentação entre as partes dos sistemas.

Segundo FORD (1999), algumas das principais vantagens oferecidas pela técnica de modelagem por DS são:

- Facilidade de lidar com assuntos de longo e curto prazo de sistemas reais;
- Simplicidade com que relações complexas e não-lineares podem ser modeladas;
- Facilidade em modelar variáveis sociais e psicológicas e
- Facilidade com que os efeitos de políticas alternativas podem ser testados.

Uma das grandes vantagens da DS frente às técnicas tradicionais consiste no fato de permitir a representação tanto de fluxos físicos (acumulados), como fluxos de informações (observados).

A técnica de Dinâmica de Sistemas pode ser dividida em 8 etapas:

1. Verificação de conhecimento sobre o sistema - Nesta etapa, deve-se obter o maior conhecimento possível sobre o objetivo do modelo, familiarizar-se com todas as relações que regem o sistema e identificar-se claramente as variáveis mais importantes. Em geral, não é possível representar todas as variáveis do sistema.

2. Especificação do comportamento dinâmico - A partir do detalhamento do sistema realizado em 1, deve-se fazer a seguinte pergunta: o sistema tem realmente um comportamento dinâmico? Se a resposta for afirmativa, elaborar um gráfico em relação ao tempo da variável mais importante do modelo, conhecida como "modo de referência". Esta é provavelmente a etapa mais importante do processo.

3. Construção do diagrama de estoque e fluxo - Aqui algumas regras simples, mas muito efetivas, devem ser observadas. Inicialmente definir as variáveis de estoque, após, adicionar seus fluxos e, finalmente, as demais variáveis constantes do modelo. Não esquecer que a variável do "modo de referência" deve estar presente no diagrama.

4. Construção do diagrama de laço causal - A finalidade deste diagrama é a visualização dos principais laços do modelo. Em alguns sistemas, a estrutura dos laços é muito complicada. Nesta situação, a elaboração de vários laços parciais é indicada.

5. Estimação de valores e parâmetros - A estimativa de cada parâmetro do modelo deve ser feita de modo individualizado, fazendo uso de fontes disponíveis. Quanto a faixa de incertezas dos parâmetros, alguns deles podem ser conhecidos, com uma precisão próxima a 100%; outros com uma precisão de 10%, e outros ainda podem ser totalmente desconhecidos. No último caso, a tendência é não representar a variável do modelo, mas isso deve ser eliminado porque sua precisão poderá ser melhorada no futuro.

6. Simulação do modelo - O objetivo é verificar se os resultados do modelo estão de acordo com o comportamento do modo de referência (etapa 2). Se isto se confirmar, alcança-se uma das metas do processo de elaboração, a consistência do modelo.

7. Análise de sensibilidade - Esta etapa procura verificar se os resultados são sensíveis a alterações nos parâmetros incertos (controlados pelo sistema). Se após cada teste, o modo de referência mantém um comportamento adequado, alcança-se outra meta do processo de elaboração, a robustez do modelo.

8. Aplicação de testes de políticas - A última etapa do processo tem a finalidade de avaliar o comportamento do sistema, variando as estimativas dos parâmetros associados às variáveis políticas

(controladas pelo projetista). Essas variáveis são o conjunto de medidas que os agentes envolvidos poderão implementar.

3.1 DIAGRAMAS DE ESTOQUE E FLUXO (DEF)

A diagramação para os sistemas dinâmicos realimentados foi proposta por FORRESTER em 1961. Tais símbolos e regras são utilizados para a construção dos diagramas de estoque e fluxo, utilizados para a modelagem computacional.

De acordo com SENGE (1998), “os estoques e fluxos são responsáveis por retardos; eles dão inércia e memória aos sistemas; eles podem ampliar ou atenuar distúrbios; e são fundamentais na formulação dinâmica produzida por sistemas”.

A simbologia dos DEFs é padronizada de acordo com a descrição a seguir:

Níveis: todas as equações de nível, e quaisquer equações que envolvam integrações, são representadas por um retângulo. A este símbolo estará associado o nome da variável de nível, sua equação correspondente e as variáveis de taxa que influenciam o nível.

Taxas (políticas): uma variável de taxa recebe informações e controla um fluxo, servindo como uma válvula num sistema hidráulico. Por este motivo, o símbolo é uma válvula, que associa o nome da variável, sua equação e suas entradas (informações).

Auxiliares: muitas vezes as variáveis de taxa são funções complicadas das variáveis de nível. Neste caso, subdivide-se uma variável de taxa em variáveis auxiliares. Seu símbolo é um círculo, e associa o nome da variável, a equação correspondente e suas entradas.

Linhas de fluxo: existem fluxos conservativos, como, por exemplo, nascimento ou morte de pessoas; e fluxos não conservativos, como, as taxas de natalidade e mortalidade, ou seja, as informações. Os fluxos físicos representam quantidades conservativas, que podem ser movidas de um lugar para outro no sistema. Os fluxos de informação, não conservativos, que realizam a interconexão entre os fluxos físicos, ou seja, auxiliam na tomada de decisão. Por exemplo, o nível da população depende dos fluxos físicos de nascimentos ou mortes, que, por sua vez, dependem, respectivamente, das informações referentes às taxas de natalidade e mortalidade. A convenção para os símbolos de fluxo depende do software utilizado.

Retirada de informação: a retirada de informação sobre uma variável é feita sem que esta seja afetada, sua representação gráfica é um círculo na região externa do símbolo da variável que cede a informação. Este círculo não representa a remoção do conteúdo da variável, mas a transferência de informação sobre sua magnitude.

Parâmetros (constantes): um losango representa uma constante, que é o valor que permanece inalterado durante a simulação.

Fontes e sumidouros: quando a origem (fonte) e/ou o destino (sumidouro) de um fluxo físico não exerce influência sobre o sistema, a fonte e o sumidouro são simbolizados por uma nuvem, que representa os limites do modelo.

A Figura 7, retirada de BORDIN (2000), apresenta a simbologia dos DEFs, construída a partir do software PowerSim 2.5.

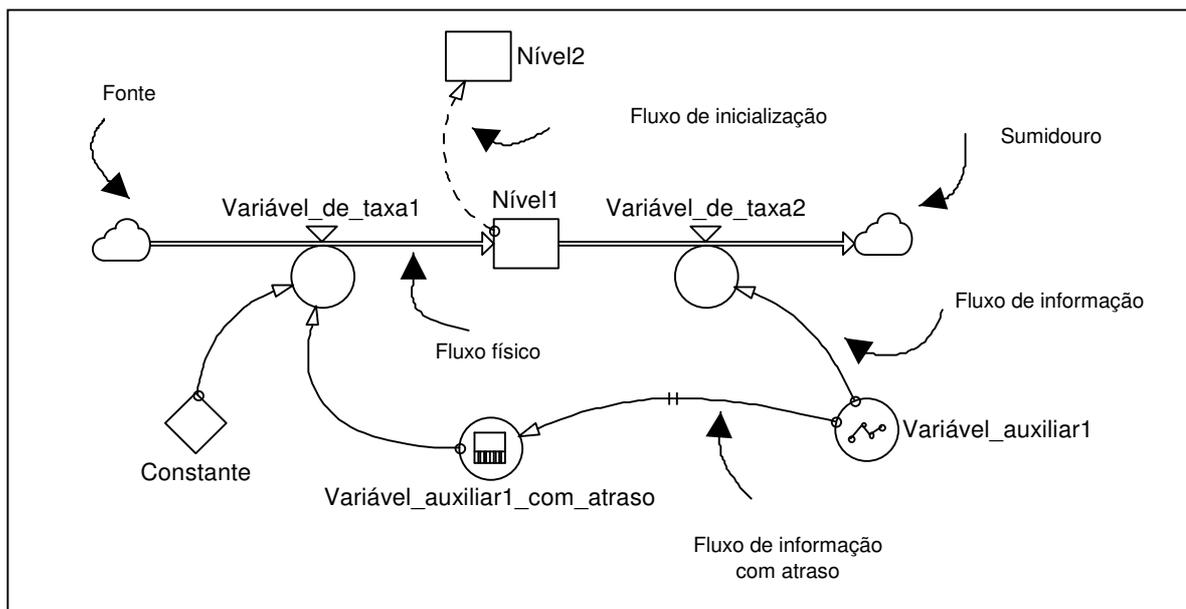


Figura 7 Diagrama de Estoque e Fluxo.

Fonte: retirado de BORDIN, 2000.

3.2 DIAGRAMAS DE LAÇO CAUSAL (DLC)

O Diagrama de Laço Causal (DLC) consiste em uma técnica de representação de sistemas, os quais possuem relações de causa-efeito. Estas representações são chamadas de laços devido às características de realimentação contidas nas relações.

Também conhecidos como diagramas “Word & Arrow” (Palavra & Seta, em português), os DLCs possuem estruturas simples, compostas apenas de setas e palavras, as quais representam as relações entre diversas variáveis. Apesar da aparente simplicidade, os laços são compostos de variáveis qualitativas e quantitativas as quais, muitas vezes, geram uma grande complexidade nas simulações.

Enquanto as palavras representam as variáveis, as setas simbolizam as relações causais entre essas. Estas relações podem ser positivas ou negativas e são simbolizadas com um + ou com um -, junto às setas, respectivamente. A polaridade das setas define a polaridade dos laços, as quais também são simbolizadas com o símbolo (+) para laços de realimentação positivos e com um (-) para laços de realimentação negativos.

A partir dos DLCs são gerados modelos matemáticos que, por sua vez, são utilizados nas simulações dos sistemas. A precisão dessas simulações dependerá do número de variáveis consideradas e da correta modelagem de seus comportamentos.

A Figura 8 apresenta um exemplo simples de modelagem via Diagrama de Laço Causal. Neste exemplo, temos dois laços causais, sendo um positivo e outro negativo. No primeiro, temos a variável “taxa de nascimentos” a qual influencia positivamente para o aumento no número de nascimentos. Este aumento, por sua vez, contribui para o crescimento da população e, finalmente, com o crescimento da população há um crescimento no número de nascimentos e de mortes. O número de mortes recebe outra contribuição positiva, a taxa de mortalidade. Ainda, com o aumento do número de mortes há uma redução da população.

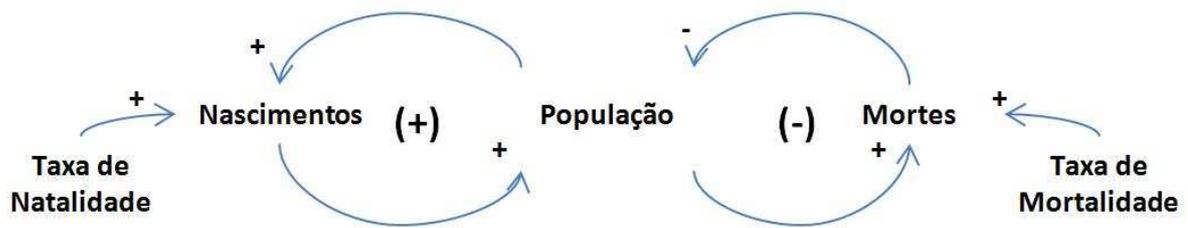


Figura 8 Exemplo de Diagrama de Laço Causal.

Fonte: retirado de FORD, 1999.

De acordo com FORD (1999), Os sistemas reais possuem características de realimentação onde as variáveis afetadas podem influenciar as variáveis causais, representando uma sucessão de relações causa-efeito circulares. Os modelos em DS dizem respeito à sistemas dotados desta relações. Um laço causal é sempre caracterizado por sua polaridade, determinada pela seqüência de relações causais individuais no caminho circular.

Ainda de acordo com FORD (1999), há duas maneiras de determinar a polaridade do laço causal. Na primeira, considera-se o laço causal em regime permanente. Em seguida, altera-se alguma variável em alguma direção, isto é, aumenta-se ou diminui-se seu valor a partir de uma condição de equilíbrio, observando-se o efeito desta variação nas demais variáveis que compõem o laço causal. Se o laço apresentar uma resistência à mudança original, diz-se que o efeito é de balanceamento e o laço é considerado de realimentação negativa. Por outro lado, se o laço apresentar um reforço à modificação realizada, diz-se que o efeito é de reforço e o laço é considerado positivo. O segundo método de determinação da polaridade do laço é mais simples. Neste, basta somar o número de sinais negativos que compõem o laço. Se o número resultante for par, o laço é de realimentação positiva. Caso o número de sinais negativos for ímpar, o laço é de realimentação negativa.

A Figura 9 apresenta um laço causal de realimentação negativa. As duas barras que cortam o sinal de “Tarifa” representam um atraso no sistema. Neste caso, um aumento na tarifa gera um aumento na conservação de energia elétrica. Todavia, esta conservação não ocorre instantaneamente, por isso, considera-se um atraso no sistema.

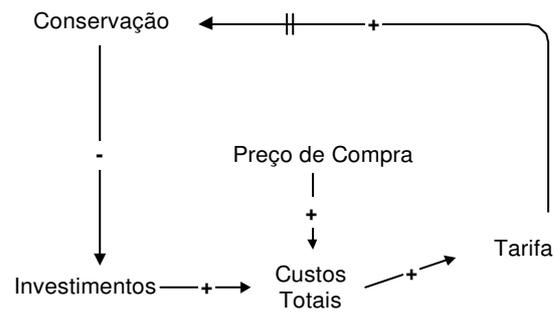


Figura 9 Diagrama de laço causal com realimentação negativa.

Fonte: retirado de BORDIN, 2000.

Outro fator que caracteriza os DLCs consiste na ordem dos laços de realimentação, a qual é determinada através do número de níveis em um laço. Assim, um laço de realimentação de primeira ordem possui unicamente um nível; um laço de segunda ordem possui dois níveis; de terceira ordem possui três níveis, e assim por diante. A ordem de um sistema constituído por mais de um laço de realimentação é o número total de níveis do sistema, independentemente da ordem de cada laço de realimentação individual.

4 MODELAGEM

4.1 MODELO DE DYKES & STERMAN

Em 2010, Katherine L. Dykes e John D. Sterman, membros da Engineering Systems Division (Divisão de Engenharia de Sistemas) do Massachusetts Institute of Technology (MIT), propõem, em seu trabalho intitulado *“Boom and Bust Cycles in Wind Energy Diffusion Due to Inconsistency and Short-term Bias in National Energy Policies”*, um diagrama de laço causal, visando analisar a influência das políticas energéticas de diversas nações e estados na aceleração ou atraso no desenvolvimento da indústria eólica.

A Figura 10 apresenta o modelo proposto por Dykes e Sterman. Em azul, é apresentado o modelo simplificado, incluindo somente as variáveis principais. Em vermelho, estão as variáveis secundárias, as quais também influenciam na capacidade instalada de geração eólica, porém cuja influência não é tão acentuada quanto a das variáveis principais.

No modelo simplificado pode-se identificar quatro laços realimentados, sendo eles: a saturação do mercado, o crescimento da indústria, a aceitação da população e a resistência da mesma, simbolizada pelo acrônimo NIMBY (do inglês not in my backyard), o qual simboliza a oposição da população.

No sistema secundário, por sua vez, há a presença de cinco laços causais realimentados. São eles: três laços relacionados à integração com a rede, um laço de aprendizado, relacionado à experiência da indústria, e um laço relacionado ao preço da energia elétrica.

A partir do modelo proposto, Dykes e Sterman realizaram simulações buscando identificar os efeitos de uma política inconsistente para diferentes cenários históricos de nações e estados. O objetivo do presente Projeto de Diplomacia consiste em elaborar um modelo teórico de análise de investimentos de energia eólica, do ponto de vista de uma indústria focada em sustentabilidade. Desta forma, este trabalho não detalhará os resultados obtidos por Dykes e Sterman, somente utilizará o diagrama de laço causal proposto por estes autores como base para o modelo proposto na seção seguinte.

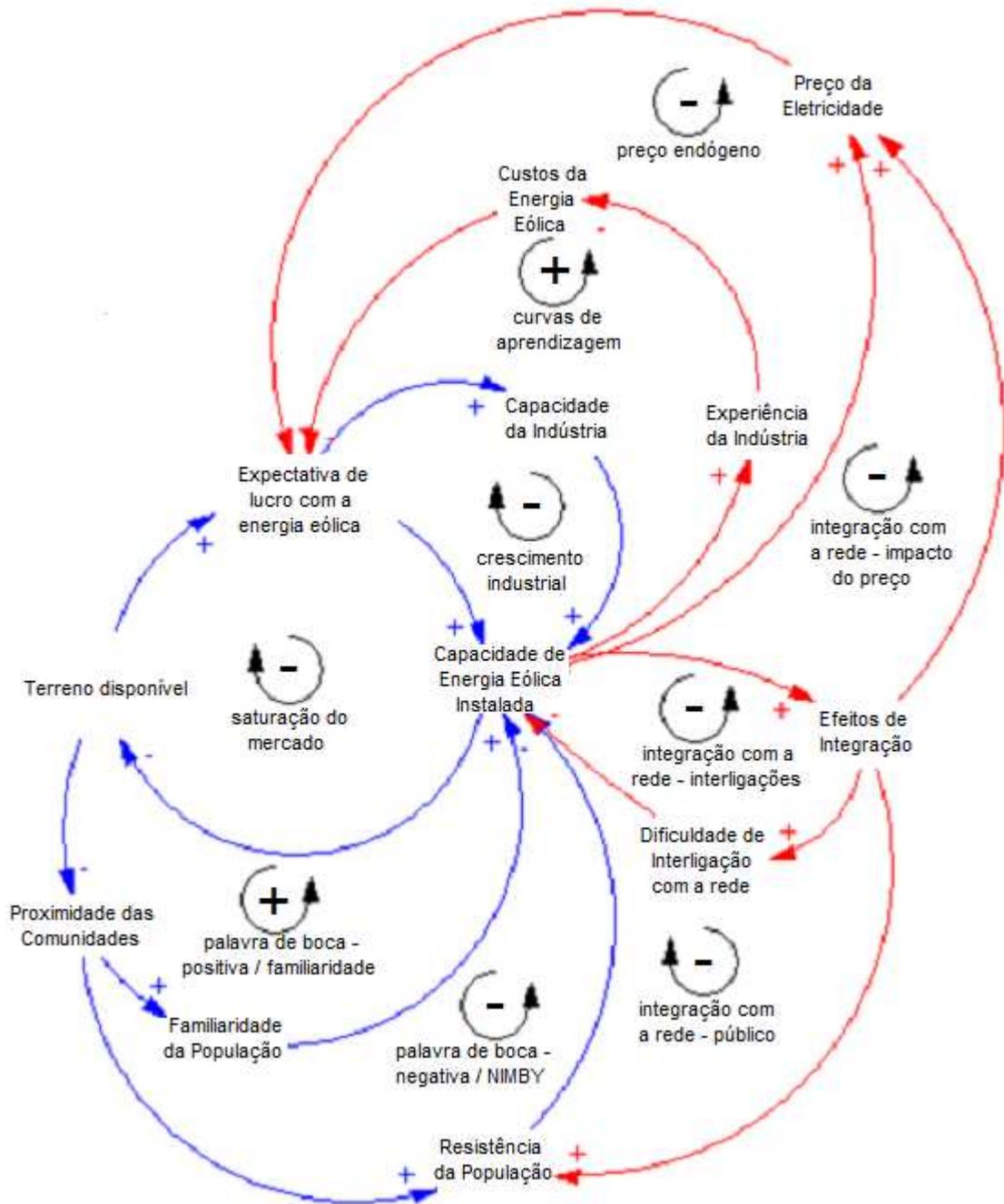


Figura 10 DLC Proposto por Dykes e Sterman.

Fonte: retirado de Dykes & Sterman, 2010.

4.2 MODELO PROPOSTO

A Figura 11 apresenta o modelo proposto por este trabalho, com o objetivo de avaliar a viabilidade de investimentos no setor eólico, a fim de atender totalmente ou parcialmente a demanda de uma indústria.

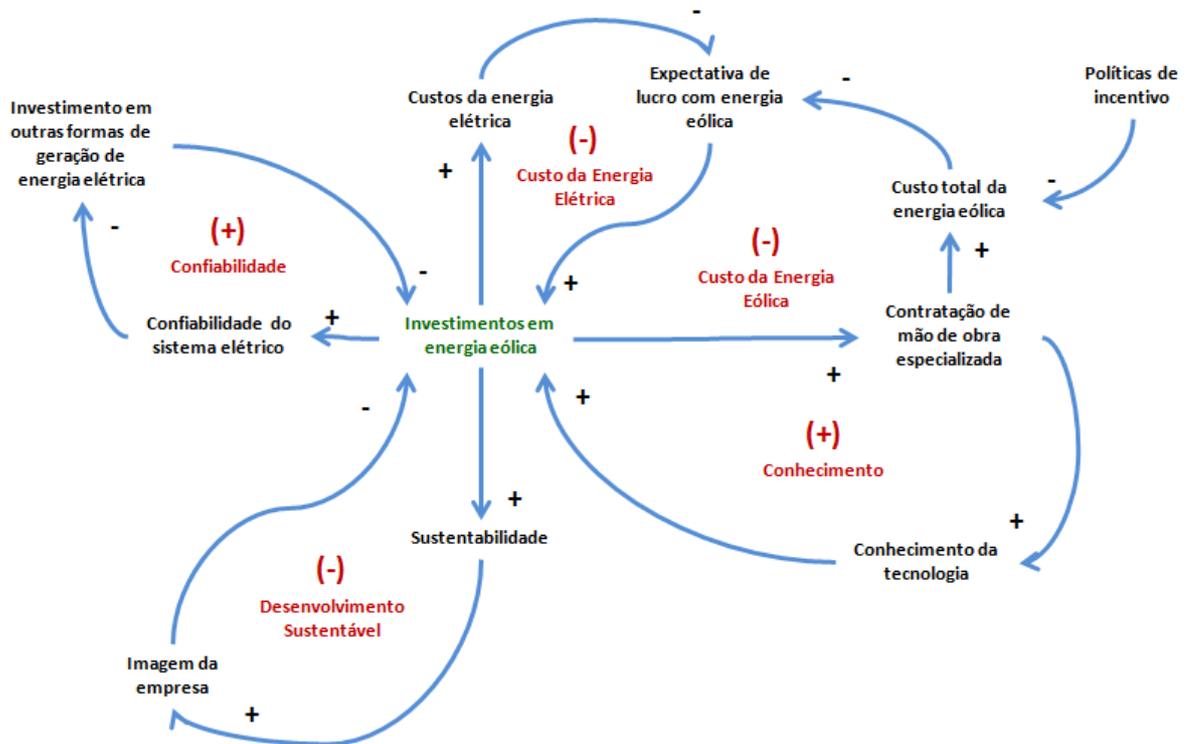


Figura 11 Modelo proposto para análise de investimentos no setor eólico.

O modelo proposto neste trabalho possui 5 laços de realimentação e foca-se em questões relacionadas a: desenvolvimento sustentável, custos, confiabilidade e conhecimento da tecnologia. Como em qualquer processo modelado através da técnica de DS, a quantidade de variáveis as quais podemos considerar tende ao infinito. Porém, este trabalho buscou concentrar-se nas questões mencionadas acima, visto estes serem os tópicos mais importantes para a análise de investimentos neste setor.

O DLC proposto por Dykes e Sterman foi utilizado como base para esta modelagem, contudo, por tratar-se de trabalhos com objetivos distintos, algumas adaptações foram realizadas. Por exemplo,

enquanto o modelo de Dykes e Sterman trabalha com profundidade as questões de aceitação e rejeição da população frente às usinas de geração de energia eólica, no modelo proposto por este trabalho considera-se que este tipo de investimento por parte de empresas privadas é bem aceito pela população, gerando uma melhora na imagem da empresa, por conta da idéia de desenvolvimento sustentável associada à este tipo de energia renovável.

Outro exemplo consiste no laço de aprendizado, o qual compõe o modelo de Dykes e Sterman. Este foi adaptado de forma que se considerou uma nova variável no laço, denominada “contratação de mão de obra especializada” a qual, por um lado, aumenta os custos da geração de energia eólica, porém, também aumenta o conhecimento a respeito desta forma de geração, incentivando assim, um maior número de investimentos no setor.

No Capítulo 5, os laços propostos serão analisados detalhadamente, de forma a auxiliar na compreensão do modelo.

5 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A aplicação do modelo de análise de investimentos proposto, dar-se-á a partir de um estudo de caso teórico. Como o trabalho busca o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio a empresas que não possuem a energia elétrica como produto principal e apenas buscam tornar-se, de forma parcial ou totalmente, auto-suficientes eletricamente, foi escolhida para este estudo uma empresa do ramo petroquímico.

A empresa escolhida foi a BRASKEM S/A, pertencente ao grupo ODEBRECHT e considerada a maior petroquímica das Américas. Como a mesma possui diversas unidades industriais situadas em países distintos, para melhor direcionar o estudo, foi analisado o fornecimento de energia elétrica apenas para a Unidade de Insumos Básicos – RS (UNIB-RS), situada em Triunfo/RS.

5.1 UNIDADE DE INSUMOS BÁSICOS – RS (UNIB-RS)

A Unidade de Insumos Básicos, ou UNIB, responde pelas operações de petroquímicos da primeira geração, entre os quais eteno e propeno, utilizados na fabricação de resinas termoplásticas. Produtos aromáticos e outros intermediários químicos também fazem parte de sua área de competência. A produção de produtos na UNIB está dividida nas seguintes plantas: Olefinas (eteno, propeno de grau polímero e de grau químico, butadieno, isopropeno e 1-buteno) e Aromáticos (benzeno, tolueno, para-xileno e orto-xileno).

Os produtos dessa unidade são empregados principalmente na fabricação de resinas termoplásticas por outras Unidades de Negócios da BRASKEM S/A e por seus clientes. As operações da Unidade de Insumos Básicos são conduzidas em instalações localizadas nos pólos petroquímicos de Camaçari (UNIB-BA) e Triunfo (UNIB-RS).

Devido ao grande consumo elétrico, característicos de seus processos e a confiabilidade de fornecimento de energia elétrica necessária para manter as plantas operando 24 horas por dia, conforme apresentado na Figura 12, as Unidades de Insumos Básicos da BRASKEM S/A também são caracterizadas pela presença de centrais termoelétricas de geração de energia.

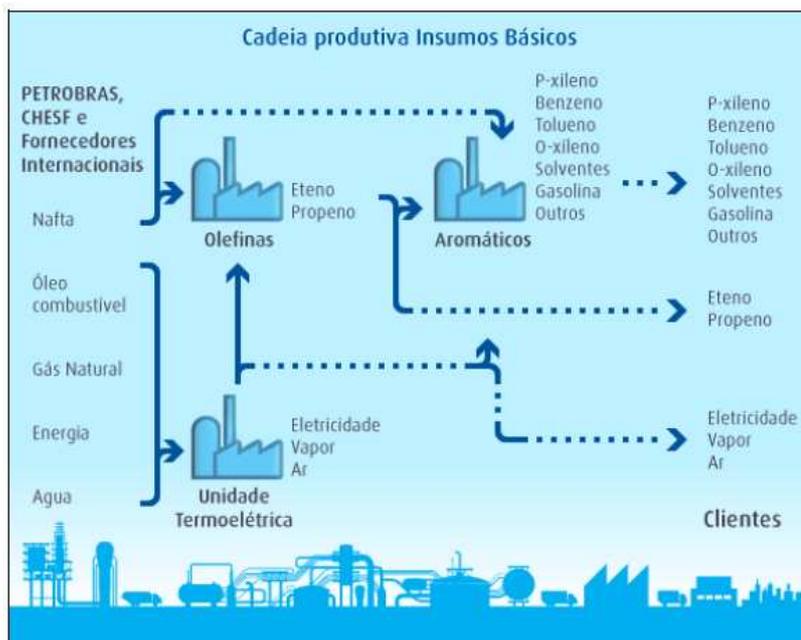


Figura 12 Cadeia Produtiva de Insumos Básicos.

Fonte: retirado de BRASKEM, 2010.

A UNIB-RS conta com uma central termoelétrica composta por duas caldeiras aquatubulares as quais queimam carvão, óleo, gás, cera e borra oleosa com tiragem balanceada e uma caldeira aquatubular queimando óleo e gás, com tiragem forçada.

Cada caldeira produz em média 280 t/h de vapor de super alta pressão (VS), sendo que normalmente uma delas fica parada e somente duas operam.

Os níveis de vapor da unidade são classificados de acordo com a Tabela 2.

Nomenclatura	Abreviação	Pressão	Temperatura
Vapor de super alta pressão	VS	113 kgf/cm ²	525 °C
Vapor de alta pressão	VA	42 kgf/cm ²	400 °C
Vapor de média pressão	VM	18 kgf/cm ²	315 °C
Vapor de baixa pressão	VB	4,5 kgf/cm ²	225 °C

Tabela 2 Níveis de Vapor da UNIB-RS

5.1.1 Sistema Elétrico da UNIB-RS

O sistema elétrico fornece alimentação para as unidades de produção da empresa e tem como alimentação as seguintes fontes:

Dois alimentadores provenientes da subestação da CEEE (AL5 e AL9);

Dois turbogeradores a vapor (TGVs);

Um turbogerador a gás (TGG).

A subestação 93 (SE-93) recebe três entradas em 230kV e possui quatro transformadores de 230/34,5 kV, com a finalidade de alimentar o Pólo Petroquímico do Sul. Dois desses alimentadores (AL5 e AL9) são destinados a alimentação da UNIB-RS, conforme é apresentado na Figura 13.

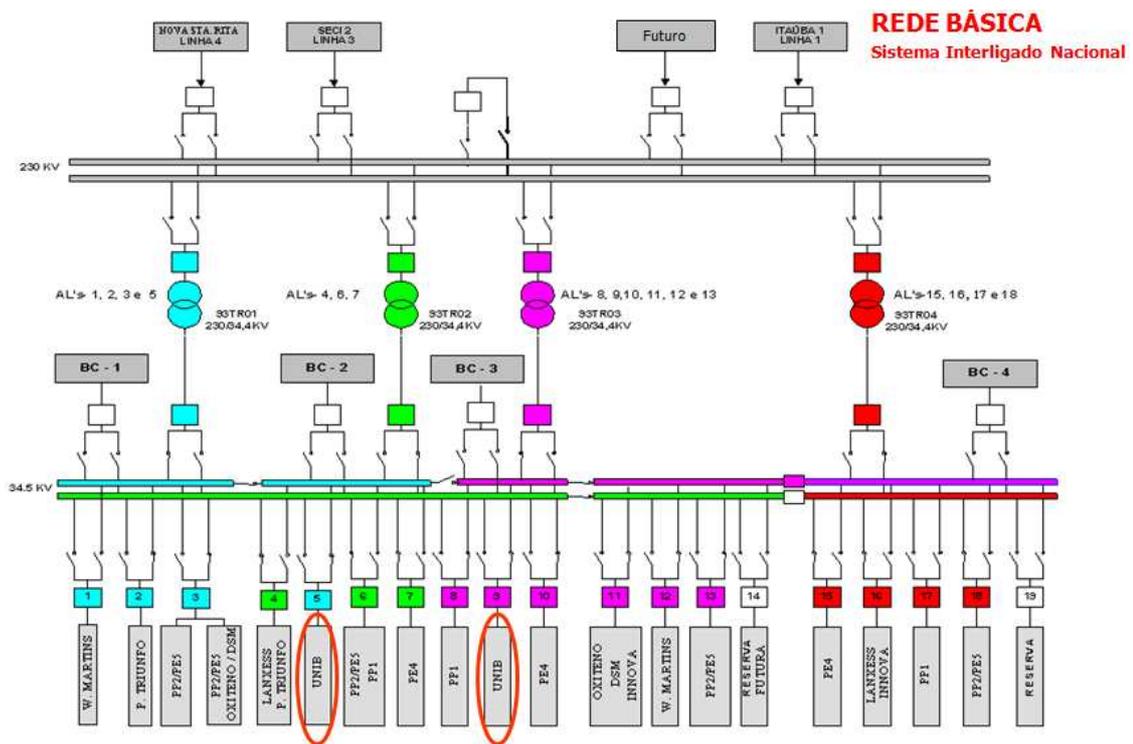


Figura 13 Alimentação Elétrica do Pólo Petroquímico do Sul.

Além das entradas externas, a UNIB-RS também possui três turbogeradores, dois a vapor e um a gás. Os turbogeradores a vapor consistem em dois conjuntos turbina/reductor/gerador da Siemens. Os mesmos foram instalados na partida do Pólo, em 1980. Além de gerarem energia elétrica para a unidade, também são responsáveis pelo fornecimento de vapor de alta pressão (VA).

Em uma condição normal de operação, seu funcionamento vai depender tanto da demanda de energia elétrica, quanto da vazão de da pressão do coletor de VA (42 kgf/cm²).

A Figura 14 apresenta um dos turbogeradores a vapor em uma parada geral para manutenção.

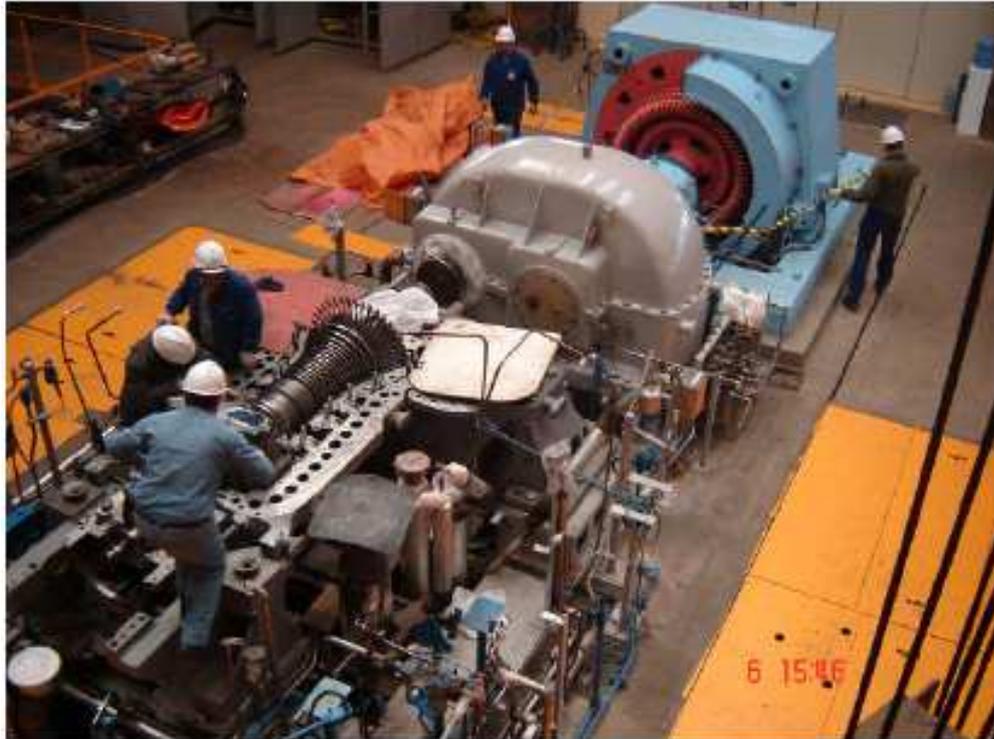


Figura 14 Turbogenerador a vapor.

O turbogerador a gás iniciou sua operação junto com a planta de Olefinas 2, no ano de 1999 e consiste em um conjunto de compressor, câmara de combustão, turbina, redutor e gerador, da GE (General Electric). Possui uma capacidade de geração de até 38 MW, mas, devido à temperatura do exausto, opera com uma carga de no máximo 34 MW.

A energia elétrica é gerada em 13,8 kV, mas é elevada a 34,5 kV para ser conectada a subestação de distribuição SE-145.

O turbogerador a gás opera em ciclo de co-geração, ou seja, os gases exaustos são utilizados para pré-aquecer a água que é enviada para os fornos de pirólise da planta de processo Olefinas 2 (OLE2).

O principal combustível utilizado trata-se do Gás Natural. Devido a um incentivo do governo, para a utilização de ciclos de co-geração, seu custo é bem menor do que o do gás natural utilizado nas caldeiras. Também há a possibilidade de queimar diesel, mas devido a seu alto custo, este combustível não é utilizado. Uma foto da máquina, juntamente às suas chaminés, é apresentada na Figura 15.



Figura 15 Turbogenerador a Gás.

5.1.2 – Demanda elétrica da UNIB-RS

A demanda elétrica da UNIB-RS, desde a instalação da planta de processo de OLE2 em 1999, não havia sofrido alterações muito consideráveis. Na época, quando da ampliação da planta de processo, foi prevista a instalação do turbogerador a gás, a fim de suprir a demanda adicional.

Até setembro de 2009 a carga elétrica da unidade oscilava entre 57 MW e 60 MW, dependendo do período do ano. Todavia, no mês mencionado, houve uma elevação considerável neste valor, visto a instalação de uma nova planta de processo, denominada Eteno Verde (EV). Esta planta foi responsável por um aumento superior a 10% na carga da planta, fazendo com que esta atingisse valores em torno de 67 MW, conforme é apresentado na Figura 16.



Figura 16 Evolução da Carga Elétrica da UNIB-RS.

Como, apesar do aumento na carga elétrica da unidade, não houve aumento na capacidade de geração, foi realizada uma redistribuição das cargas entre as fontes de energia elétrica, de forma que, dos 67 MW consumidos, 33 MW passaram a ser gerados no turbogerador a gás, 24 MW passaram a ser gerado nos turbogeradores a vapor e 10 MW passaram a ser comprados da concessionária.

5.2 LAÇO CAUSAL DE CONFIABILIDADE

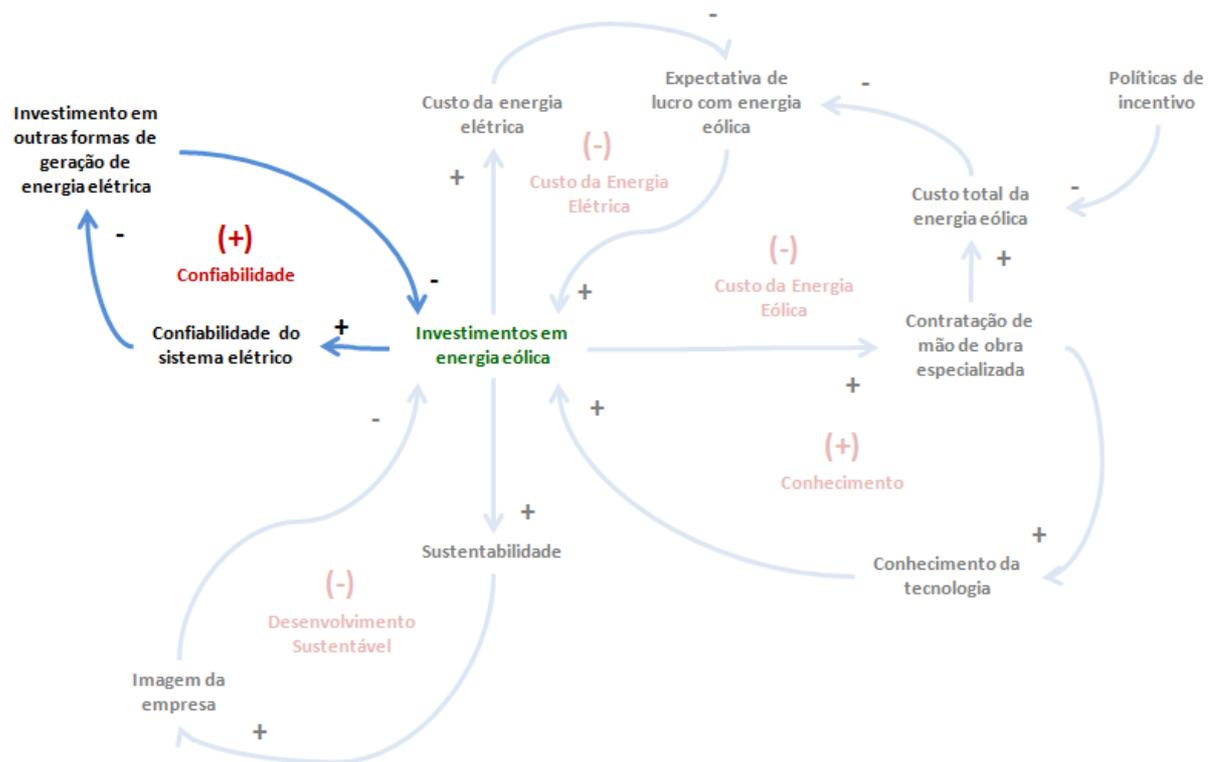


Figura 17 Laço Causal de Confiabilidade.

O laço causal de apresentado em destaque na Figura 17 está diretamente relacionado com a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica da indústria. Desta forma, foi nomeado como *Laço de Confiabilidade*.

Basicamente, supõe-se que a realização de investimentos em aerogeradores contribui positivamente para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico da empresa. Este aumento na confiabilidade, gerado através da energia eólica, reduz os investimentos em outras fontes de geração, como a termoelétrica, por exemplo. Finalmente, o número de investimentos nessas outras fontes de geração de eletricidade é inversamente proporcional ao número de investimentos em parques eólicos. Realizando modificações em alguma das variáveis, mantendo as outras constantes, tem-se um reforço à mudança, o laço é classificado como positivo e, ainda, o número de sinais negativos no laço é par, conforme as regras de DS na classificação dos laços

Novamente, utilizando-se o exemplo da UNIB-RS, devem ser considerados os seguintes fatores, relacionados à confiabilidade do sistema:

- Distribuição das cargas entre as fontes de energia elétrica após a partida da planta de EV;
- Ponto de operação dos turbogeradores;
- Disponibilidade de combustíveis;
- Histórico de indisponibilidade de turbogeradores devido a falhas;
- Histórico de indisponibilidade de fornecimento de energia elétrica pela concessionária de energia;
- Paradas de turbogeradores para manutenções programadas e
- Necessidades de atuação da equipe operação do sistema.

A partir da análise dos fatores mencionados anteriormente é possível elaborar o DLC auxiliar, mostrado na Figura 18.

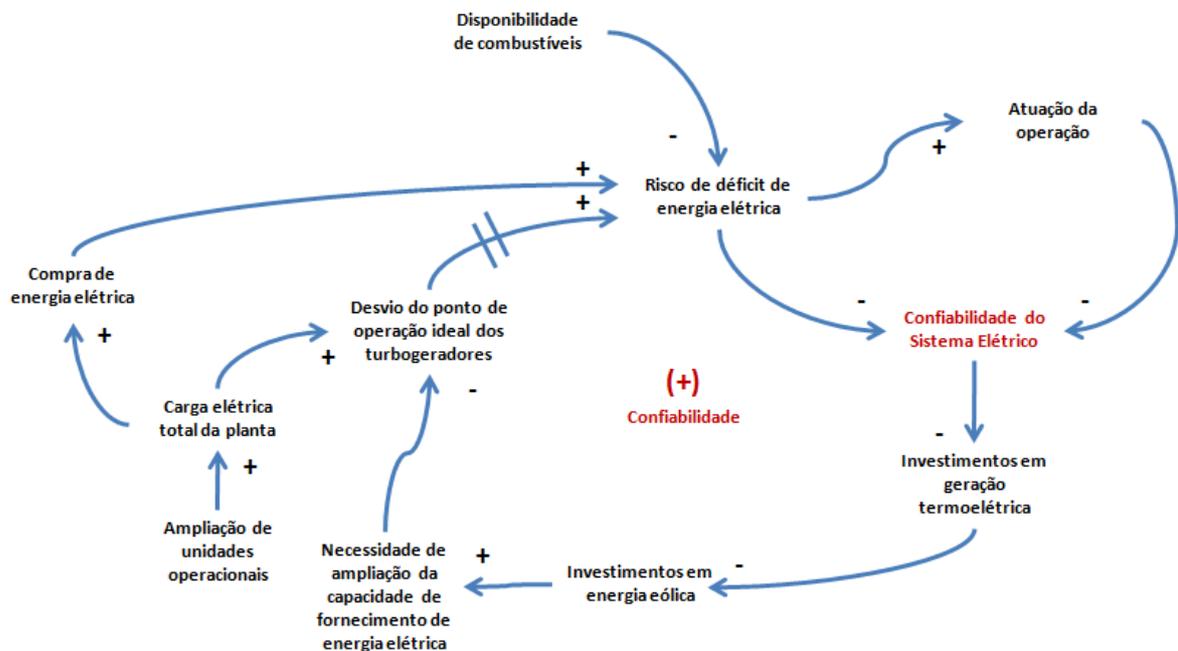


Figura 18 DLC auxiliar de Confiabilidade.

5.2.1 Alteração na divisão de cargas entre as fontes de geração

Com um aumento na carga elétrica da UNIB-RS, gerado pela partida da planta de EV, a primeira consequência que pode ser visualizada consiste na alteração na divisão de cargas entre as fontes de energia. Como efeitos desta alteração, tem-se um aumento na dependência da concessionária de energia elétrica e um desvio em relação ao ponto ótimo de operação dos turbogeradores.

De acordo com um estudo de confiabilidade do sistema elétrico da UNIB-RS, desenvolvido pela FIGENER S/A, o ponto ótimo de operação dos turbogeradores a vapor é igual a 9 MW cada um. Com a partida da planta de EV, estas máquinas passaram a operar com uma carga de 12 MW. Este desvio em relação ao ponto ideal de operação aumenta a exposição das máquinas a eventuais falhas. Além disso, deve-se reduzir o período entre as manutenções preventivas da máquina, aumentando a indisponibilidade da mesma.

Em relação à compra de energia elétrica, devem ser analisadas as ocorrências de interrupção no fornecimento de energia elétrica da concessionária. Além das possibilidades de interrupção no fornecimento, deve levar-se em conta a capacidade da subestação a qual alimenta o Pólo Petroquímico do Sul. Neste caso, a unidade é alimentada por dois transformadores de 60MW, os quais já estão operando no seu limite. Em casos de perda parcial de geração interna, limitam a quantidade de energia comprada da concessionária, podendo gerar rejeição de cargas e, em alguns casos, subtensão no secundário, provocando abertura dos alimentadores e desligamento de plantas.

5.2.2 Disponibilidade de combustíveis

Embora, neste caso de estudo, devido aos variados tipos de combustíveis utilizados nas caldeiras e turbogerador a gás, a parada de máquinas por indisponibilidade de combustíveis seja de baixa probabilidade, esta possibilidade deve ser considerada.

De acordo com históricos, em 2008, devido a um dano causado ao gasoduto que fornece GN para a planta, houve indisponibilidade do turbogerador a gás por cerca de 40 dias. Apesar de o TGG possuir a opção da queima de diesel, devido ao alto custo do mesmo, optou-se por manter a máquina parada durante este período.

5.2.3 Atuação da Operação

O aumento de carga gerado pela conexão de uma nova planta petroquímica ao sistema aumenta a necessidade de manobras e intervenções por parte da operação em casos de liberação de equipamentos para manutenção, ou troca de alimentador conectado à concessionária de energia, por exemplo.

Quanto maior o número de intervenções no sistema, maior o risco da ocorrência de uma falha humana, a qual pode acabar causando uma falta, um desligamento de máquina ou outros problemas relacionados. Assim, neste modelo, considera-se a atuação da operação como um elemento redutor da confiabilidade do sistema.

5.2.4 Considerações Gerais

Do ponto de vista da confiabilidade do sistema, muitos são os fatores a serem considerados até que a decisão de aumento na capacidade de geração seja tomada. Contudo, este acréscimo na geração pode ser feito através de qualquer fonte.

Embora a geração eólica não seja dependente da disponibilidade de combustíveis, a mesma depende diretamente da velocidade dos ventos, adicionando mais uma variável ao sistema. Todavia, no modelo apresentado por este projeto, o laço de *Confiabilidade* apenas possui a função de indicar a necessidade ou não, da ampliação do sistema de geração de energia elétrica.

A opção pela energia eólica é tomada a partir dos outros laços os quais compõem o modelo, principalmente o laço *Desenvolvimento Sustentável*, descrito a seguir.

5.3 LAÇO CAUSAL DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

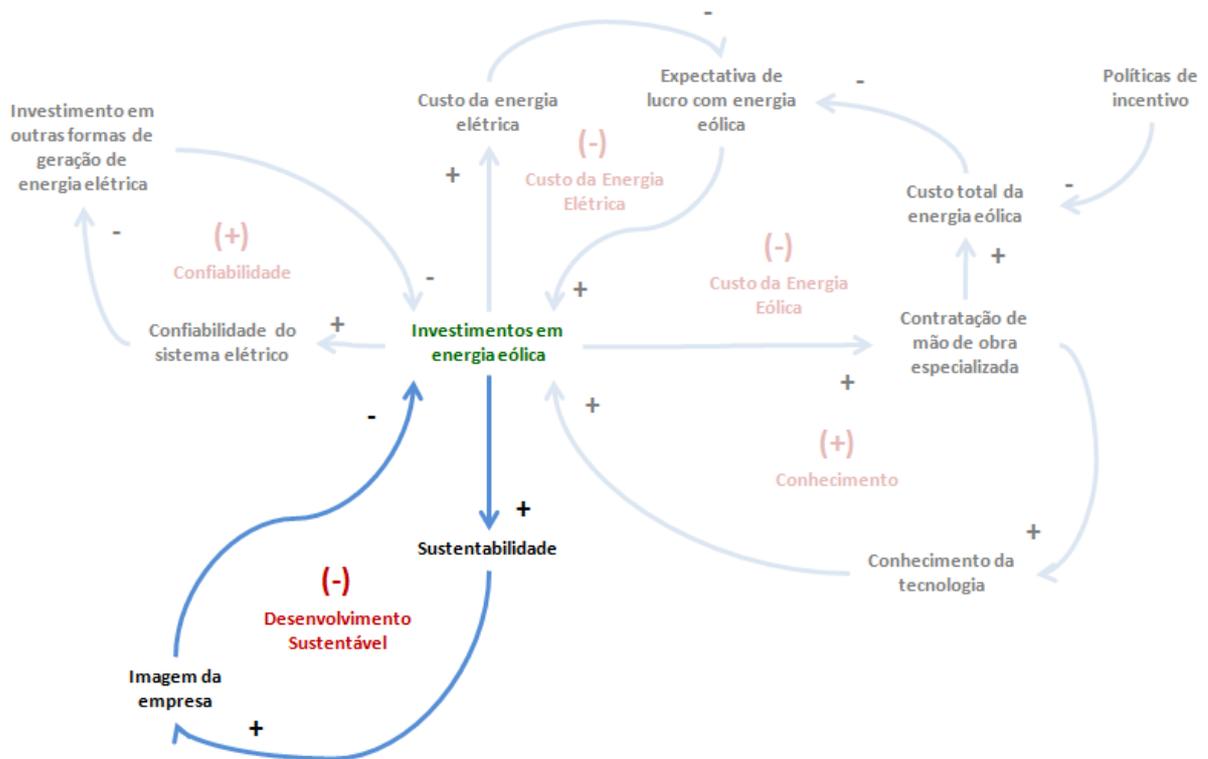


Figura 19 Laço Causal de Desenvolvimento Sustentável

O laço causal denominado *Desenvolvimento Sustentável* está relacionado à idéia de sustentabilidade associada às energias alternativas, neste caso, a energia eólica. Basicamente, quanto maior a quantia investida em energia eólica, mais auto-sustentável o sistema se torna, contribuindo positivamente para a imagem pública da empresa. Quanto maior a associação da empresa com as chamadas “tecnologias limpas”, menor a necessidade de investimentos neste setor, formando assim, um laço causal de realimentação negativa.

Dando continuidade ao estudo de caso relacionado à BRASKEM S/A, são descritos, a seguir, conceitos a respeito de sustentabilidade, além de ser apresentada a posição da empresa em relação a este tema e quais os benefícios a energia eólica pode trazer neste contexto.

5.3.1 – Conceito de Desenvolvimento Sustentável

Em março de 1987, durante a Assembléia Geral das Nações Unidas, o desenvolvimento sustentável foi descrito da seguinte forma: “desenvolvimento sustentável consiste em um desenvolvimento o qual satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem as suas”.

Conforme pode ser visualizado na Figura 20, a sustentabilidade busca a intersecção de três bases principais: econômica, social e ambiental.

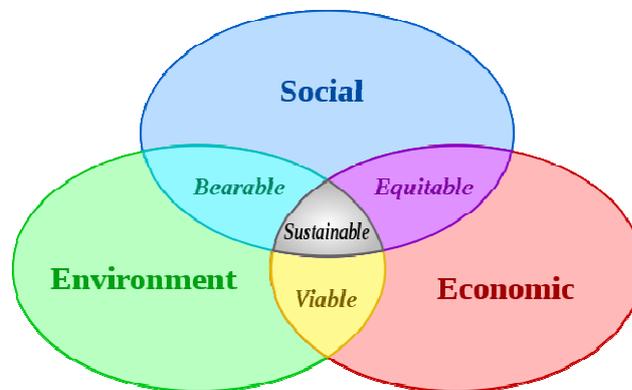


Figura 20 Pilares da Sustentabilidade

Fonte: retirado de ADAMS, 2006

Embora o conceito de sustentabilidade seja formado por três pilares, sua associação com a questão ambiental é muito superior a sua associação com questões econômicas ou sociais. De acordo com ADAM (2006), isto ocorre devido ao fato de que estas duas últimas questões já eram tratadas há muitos anos, enquanto que a questão ambiental passou a ser focada há poucos anos.

O desbalanceamento entre as três bases do desenvolvimento sustentável pode ser observado na Figura 21.

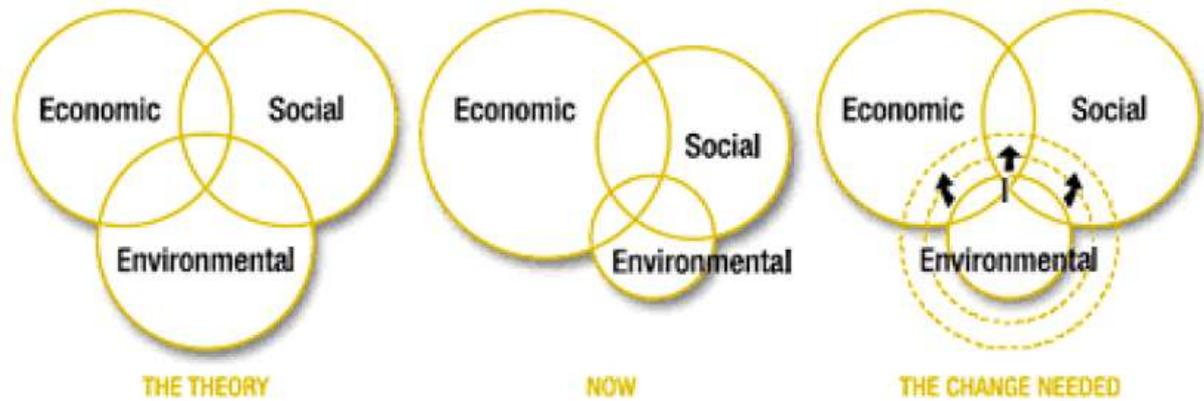


Figura 21 Desbalançamento entre os pilares de sustentabilidade

Fonte: ADAMS, 2006

As questões ambientais do desenvolvimento sustentável estão diretamente ligadas a fatores como:

- Redução de emissões de gases de efeito estufa;
- Redução da dependência dos combustíveis fósseis;
- Redução do consumo de água;
- Redução da produção de efluentes;
- Redução de perdas energéticas;
- Redução de desmatamentos;
- Redução da poluição, entre outros.

Por tratar-se de uma alternativa de geração de energia a partir de uma fonte renovável e por possuir impactos ambientais quase nulos, a energia elétrica gerada a partir de aerogeradores é considerada um dos principais caminhos em busca de um mundo sustentável.

5.3.2 – Visão 2020 da BRASKEM S/A

Devido à grande quantidade de emissões atmosféricas, geração de efluentes e consumo de água, as indústrias do ramo petroquímico, no geral, não possuem uma boa imagem pública associada à preservação da natureza. Muitos são os investimentos em parques de proteção ambiental, controle de

emissões atmosféricas avançadas, reflorestamentos, entre outros, visando o atendimento da legislação ambiental e uma maior aceitação da população.

Em meio a esse contexto, em 2010, a BRASKEM S/A divulgou sua Visão 2020 com o objetivo de que, em 10 anos, a Companhia tenha se tornado uma das 5 maiores empresas petroquímicas globais em valor econômico e seja percebida como parte da solução para o desenvolvimento sustentável, por gerar resultados econômicos com menor intensidade de emissão de gases de efeito estufa e de uso de água da indústria química mundial, posicionada como maior indústria química baseada em matérias-primas renováveis e como importante agente de desenvolvimento humano.

Para o atendimento desta meta, foram estabelecidos 7 macro-objetivos estratégicos, os quais devem ser trabalhados até o ano de 2020. São eles:

- Segurança química;
- Gases de efeito estufa;
- Eficiência hídrica;
- Eficiência energética;
- Matéria prima renovável;
- Pós-consumo e
- Pessoas.

A Tabela 3 apresenta as ações da empresa relativas aos macro-objetivos *gases de efeito estufa* e *eficiência energética*, os quais serão diretamente impactados com possíveis investimentos no setor eólico.

Macro-objetivo	O que já foi feito	Visão 2020
Gases de efeito estufa	<p>Melhoria os atuais processos de produção, com redução de 11% da intensidade de emissão de gases de efeito estufa.</p> <p>Uso de etanol para produção de ETBE e PE Verde contribuirão para evitar mais de 750 mil toneladas de CO₂ ao ano, a partir de 2011.</p>	<p>A Braskem alcança a mesma intensidade de emissões de GEE que as melhores grandes empresas químicas do mundo.</p> <p>A Braskem como importante sequestrador de emissões indiretas de GEE, por causa do uso de matérias-primas renováveis.</p>
Eficiência energética	<p>Melhoria dos atuais processos de produção, com redução de 12% da intensidade de consumo energético.</p>	<p>A Braskem alcança a mesma intensidade de consumo energético que as melhores empresas químicas de grande porte do mundo.</p> <p>A Braskem como importante usuário de energia de fonte reciclável.</p>

Tabela 3 Macro-objetivos da Visão 2020

Fonte: retirado de BRASKEM, 2010

Em relação ao macro-objetivo *gases de efeito estufa*, um investimento em energias eólicas traria uma contribuição clara, visto que reduziria a carga dos turbogeradores, reduzindo, assim, as emissões da central termoeétrica.

Para fins demonstrativos, foi realizado um cálculo, através do software ACOMB5, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Técnicas (IPT), estimando a quantidade de CO₂ emitido por uma central termoeétrica queimando óleo e carvão. Conforme é apresentado na Figura 22, o valor de CO₂ chega a 19% nas emissões.

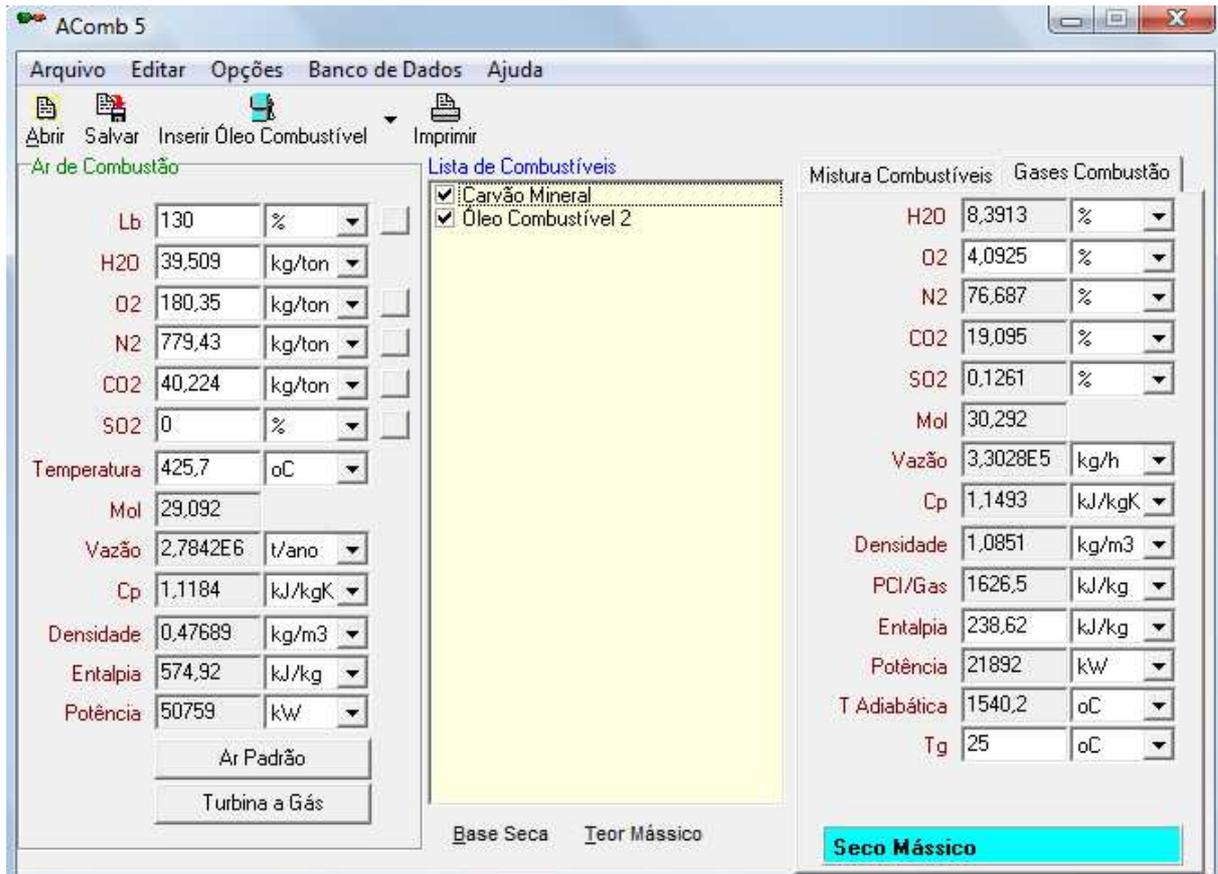


Figura 22 Simulações com o software ACOMB5

Os investimentos em energia eólica também trariam um grande impacto no macro-objetivo *eficiência energética*, visto que a mesma é calculada através da divisão entre a quantidade de saída de energia (energia elétrica e térmica) e a quantidade de entradas de energia (combustíveis). Os aerogeradores trariam um aumento na quantidade de energia elétrica gerada, gerando um aumento no valor das saídas de energia. Contudo, não trariam adição a quantidade de entradas de energia, pois não utilizam combustíveis, mas sim a força dos ventos.

As Figuras 23 e 24 apresentam os valores de eficiência dos dois ciclos térmicos da UNIB-RS (Rankine e Brayton, respectivamente). É importante ressaltar que, embora a eficiência teórica deste ciclos seja inferior a 50%, neste caso considerou-se os ciclos fechados, ou seja, toda a energia na forma de calor ou eletricidade, foi considerada como saída.

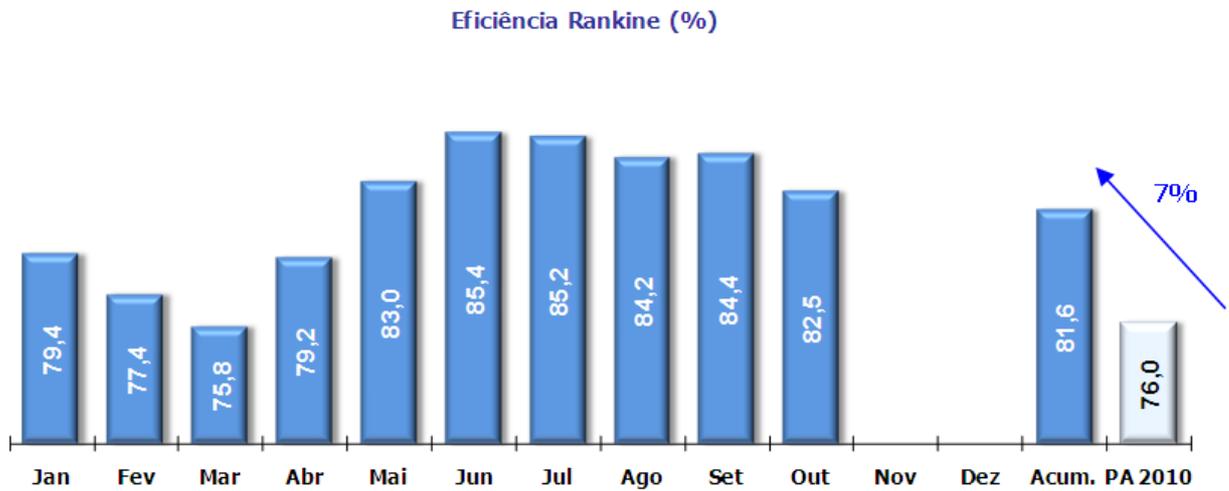


Figura 23 Eficiência do Ciclo Rankine da UNIB-RS (fechado)

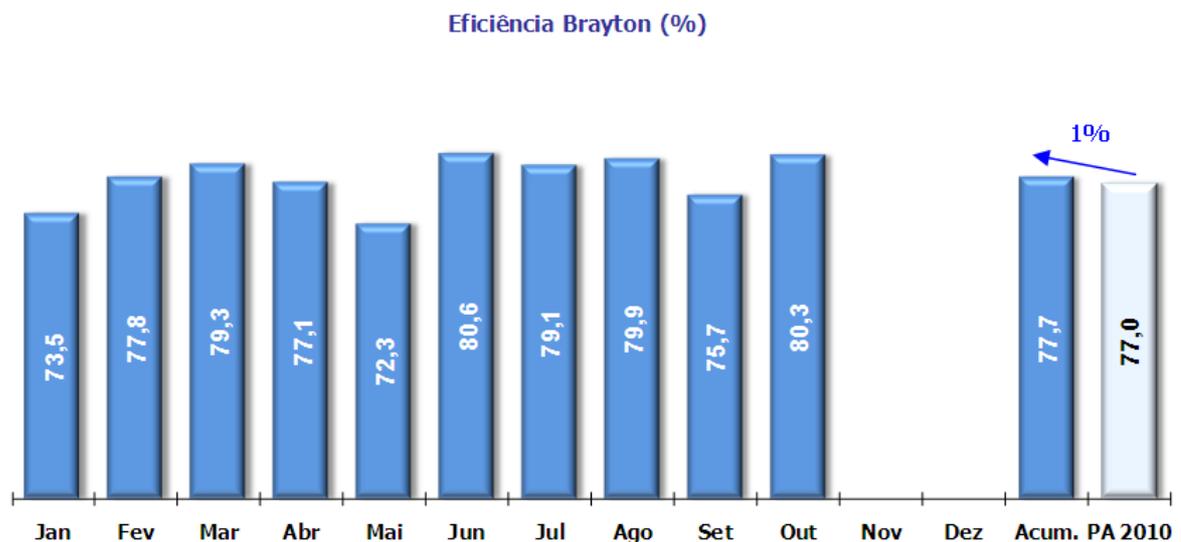


Figura 24 Eficiência do Ciclo Brayton da UNIB-RS (fechado)

5.3.3 – Considerações Gerais

Após a análise do laço de *Confiabilidade*, a fim de fazer-se uma avaliação na necessidade ou não de ampliação do sistema de geração de energia elétrica, o estudo do laço de *Desenvolvimento Sustentável* busca avaliar as vantagens de gerar essa energia a partir de fontes renováveis.

Por se tratar de uma indústria que possui a geração de energia elétrica apenas para consumo próprio, não sendo este seu produto principal, o foco da redução de gases de efeito estufa e aumento de

eficiência energética é dado às plantas de processo. Contudo, como foi apresentada, a opção por alternativas renováveis de geração de energia elétrica pode contribuir de forma significativa para a melhoria destes indicadores.

5.4 LAÇOS CAUSAIS DE CUSTO

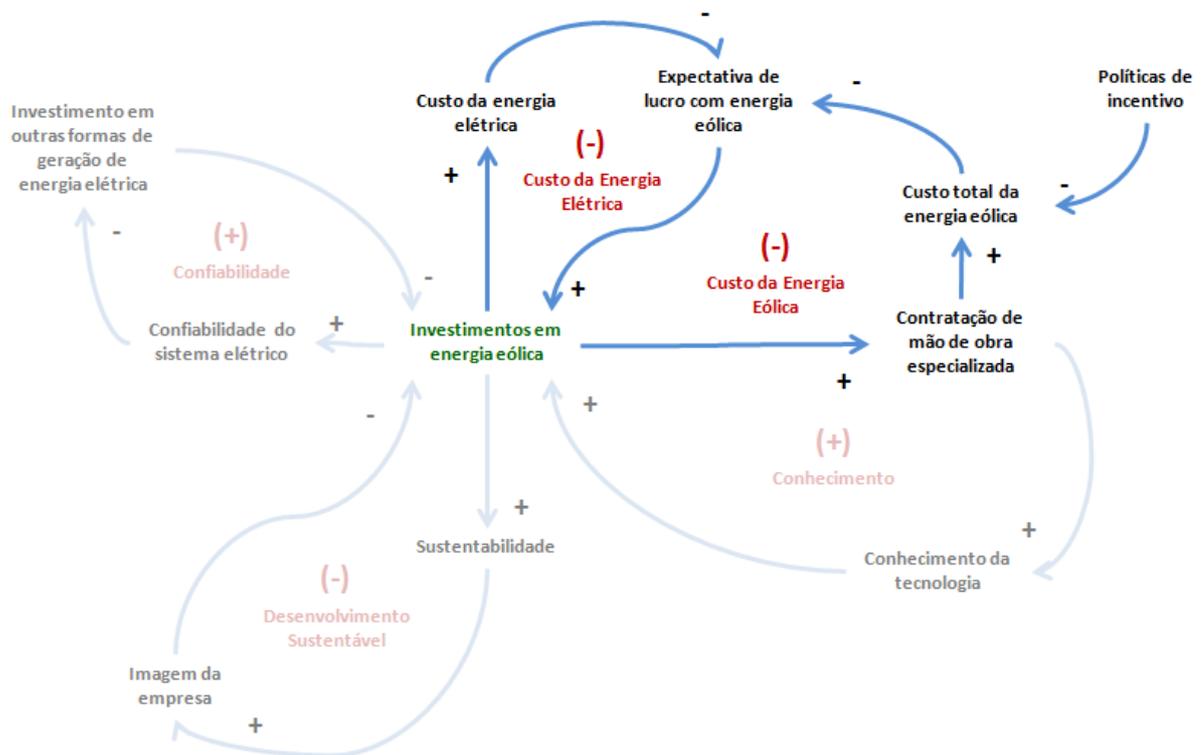
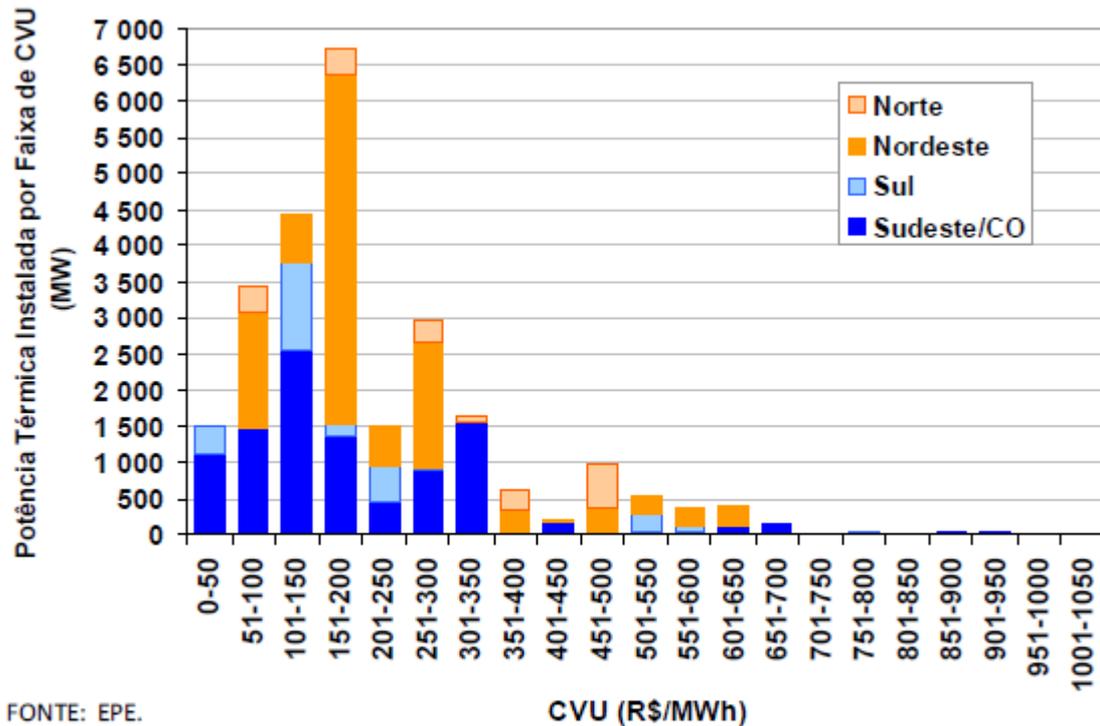


Figura 25 Laços Causais de Custo

Conforme pode ser observado na Figura 25, os laços relacionados a custo dividem-se em *Custo da Energia Eólica* e *Custo da Energia Elétrica*. O primeiro, leva em consideração o custo R\$/MWh específico da energia eólica, enquanto que o outro representa o custo médio com energia elétrica, considerando todas as fontes disponíveis (turbogeradores, alimentadores da concessionária de energia, etc...).

Devido ao fato de os dados de custo de energia elétrica da UNIB-RS serem sigilosos, este trabalho utilizará como base o valor médio do Custo Variável Unitário (CVU) da energia termoeletrica do subsistema Sul, apresentado pelo Plano Decenal de Expansão do Sistema Elétrico Nacional 2019

(PDE2019), realizado anualmente pela Empresa de Pesquisa Ebergética (EPE). Estes dados encontram-se na Figura 26.



OBS.: Data de referência dos CVU: PMO de dezembro de 2009 (ONS).

Figura 26 Distribuição do Parque Térmico por Faixa de CVU e Subsistema

Fonte: retirado de EPE, 2010

A partir da Figura 26, o valor médio para o custo marginal de geração termoeletrica calculado é de 146 R\$/MWh.

Em contrapartida, de acordo com o PDE2019, no último leilão de compra de energia de reserva, realizado em 2009, a energia eólica apresentou um valor médio de 148 R\$/MWh, contrariando todas as previsões de mercado e destacando-se como a energia alternativa com o preço mais baixo.

Apesar da pequena diferença entre os valores de preço da energia eólica, quando comparada com a energia térmica, para o caso da UNIB-RS deve-se considerar que o turbogerador a gás opera em

ciclo de cogeração, ou seja, a energia dos gases exaustos pela turbina é utilizada para o aquecimento da água que é enviada para a planta OLE2. Logo, o valor adotado (146 R\$/MWh) não pode ser utilizado para a energia gerada pelo turbogerador a gás, visto que, além de eletricidade, o mesmo gera, indiretamente, vapor. Além disso, conforme mencionado anteriormente, por operar em ciclo de cogeração, parte do custo do gás natural utilizado no turbogerador a gás é subsidiado pelo Governo, como incentivo. Este preço diferenciado pago pelo gás natural de cogeração acaba diminuindo ainda mais o custo da energia gerada no TGG, fazendo com que o mesmo seja a fonte de geração de energia elétrica mais competitiva economicamente.

Contudo, segundo FORD (1999), mesmo quando não é possível mensurar alguma das variáveis a mesma deve ser considerada na modelagem. No momento das simulações computacionais é melhor que o valor seja estimado, do que a variável ignorada. Posteriormente, caso seu valor possa ser calculado com precisão, basta modificá-lo no modelo, não existindo necessidade de remodelarmos o sistema.

Além disso, a partir de uma análise qualitativa, pode-se perceber que o custo da energia eólica será superior ao custo médio da energia elétrica da unidade. Logo, conforme descrito no modelo, o investimento nesse tipo de energia aumentará o custo médio com energia elétrica.

A conclusão que se pode tirar dos valores apresentados é a de que, embora o valor do custo médio aumente, o impacto não será significativo, visto que o custo médio da energia eólica é apenas 2 R\$/MWh superior que o custo médio de energia termoelétrica (sem considerar os reaproveitamentos de energia do ciclo de cogeração e o custo diferenciado do gás natural).

5.5 – LAÇO CAUSAL DE CONHECIMENTO

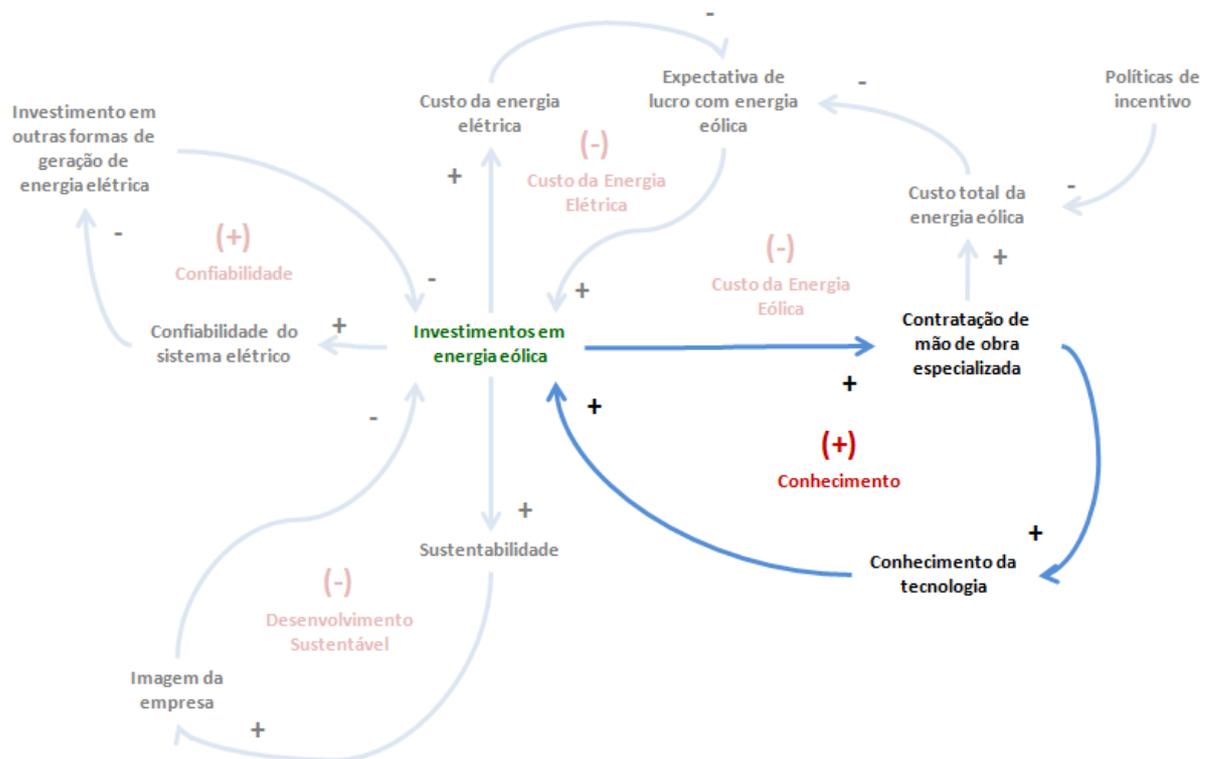


Figura 27 Laço Causal de Conhecimento

Enquanto do ponto de vista do laço causal de custo, a contratação de mão de obra especializada é um fator negativo, no laço de conhecimento este fator influencia positivamente nos investimentos em energia eólica.

Por ser uma tecnologia recente, principalmente no Brasil, a necessidade de contratação de empresas de consultoria especializadas neste tipo de geração é essencial para o sucesso do projeto. Estes investimentos, por sua vez, aumentam o conhecimento a respeito da tecnologia, facilitando a realização de ampliações no parque eólico e incentivando novos investimentos em aerogeradores, conforme é apresentado na Figura 27.

Contudo, não é o objetivo deste trabalho aprofundar-se nas questões relacionadas ao conhecimento da tecnologia. O laço é apresentado no DLC apenas como indicativo de que estas variáveis devem ser consideradas nas simulações.

6 CONCLUSÃO

A crescente pressão social na busca pela redução de impactos ambientais e por um desenvolvimento sustentável está criando um cenário cada vez mais promissor para as fontes de geração de energia alternativas. Neste contexto, a geração de energia elétrica através dos ventos consiste em uma das opções mais viáveis, tendo em vista seu baixo custo em relação às demais fontes e ao fato de gerar impactos ambientais praticamente nulos. Contudo, deve ser observado que esta não é uma solução viável para qualquer região, privilegiando apenas os locais que possuem ventos em condições específicas de velocidade e sazonalidade.

Por possuir uma matriz energética predominantemente renovável, o Brasil demorou a investir de maneira significativa neste setor. Apenas há alguns anos, devido principalmente ao crescimento do número de termoeletricas e às dificuldades no licenciamento ambiental das hidroelétricas, foi que o país começou a optar pelas fontes alternativas de geração de energia elétrica, através de programas de incentivo como o PROINFA, por exemplo.

Neste cenário, onde a preocupação com o meio ambiente nunca foi tão acentuada, a população começa a preocupar-se não só com a matriz energética de seus países, mas também com os processos de produção dos produtos os quais estão consumindo. Assim, as indústrias passaram a investir grandes quantias de dinheiro em soluções sustentáveis para seus processos. Indicadores ambientais como emissões de GEEs e eficiência energética, nunca foram tão monitorados. Apesar disso, indústrias que não possuem a energia elétrica como produto principal, mas apenas geram para consumo próprio, tendem a buscar principalmente nas termoeletricas a solução para seu suprimento de energia, devido à simplicidade do processo e a não dependência de variáveis probabilísticas, como a fluência ou a velocidade dos ventos.

Através do modelo teórico proposto, buscou-se uma análise qualitativa dos benefícios trazidos para uma indústria, através do investimento em um parque eólico. No estudo de caso realizado, observaram-se os benefícios trazidos em relação à confiabilidade, sustentabilidade e custos. Foi possível concluir que, com a tecnologia atual, é possível construir parques eólicos com um custo de geração muito similar aos custos da geração termoeletrica. Além disso, as características não poluentes

e a utilização de uma fonte renovável fazem com que esse tipo de energia contribua de maneira positiva com indicadores de sustentabilidade, tais como eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa. Em relação à confiabilidade também temos grandes ganhos, principalmente pelo fato de os parques eólicos serem compostos de diversos geradores de pequeno porte, fazendo com que a geração total da usina não dependa de apenas um gerador.

Este Projeto de Diplomação apresentou um estudo teórico e qualitativo, a partir de uma visão inovadora, consistindo no primeiro passo para a análise consistente do problema. Como tópicos para pesquisa são sugeridos a simulação quantitativa do resultado, assim como a análise da viabilidade de utilização de outras fontes alternativas, como usinas de energia solar, biomassa e PCHs, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- EPE. **Relatório Final do PDE 2019**. Disponível em:
<<http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx>>. Acesso em: outubro de 2010.
- GRAHAM, I. **Wind Power**. Heinemann-Raintree, 1999.
- FORD, A. **Modeling the Environment**. Covelo: Island Press, 1999. ISBN 1559636017.
- BORDIN, G. **Um Modelo para Estudos da Demanda de Energia Elétrica em Ambiente Competitivo**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- FORTUNA. **Moinhos a Vento**. Disponível em:
<<http://www.cataventosfortuna.com.br>>. Acesso em: agosto de 2010.
- TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Editora Interciência, 2003.
- WWEA. **Wind Energy International 2009/2010**. Disponível em:
<http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=20&Itemid=41>. Acesso em: agosto 2010.
- ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em:
< <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: agosto de 2010.
- WOBBEN ENERCON. **Energia Eólica**. Documento Interno, 2002.
- AWEA. **Utilities & Wind Power**. Disponível em:
< http://www.awea.org/la_utilitywind.cfm>. Acesso em: agosto de 2010.
- DEWI. **A Recipe to Estimate Aerodynamics and Loads on Iced Rotor Blades (1998)**. Disponível em:
<http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Publikations/seifert_icing_boreasiv_1998.pdf>. Acesso em: setembro de 2010.
- CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2009.
- DYKES, K. L.; STERMAN, J. D. **Boom and Bust Cycles in Wind Energy Diffusion Due to Inconsistency and Short-term Bias in National Energy Policies**. MIT – Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- BRASKEM. **Contribuição para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em:
<http://www.braskem.com.br/site/portal_braskem/pt/responsabilidade_social/_desenvolvimento_sustentavel/desenvolvimento_sustentavel.aspx>. Acesso em: novembro de 2010.

ADAMS, W. M. **The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century (2006)**. Disponível em:

< http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_future_of_sustainability.pdf>. Acesso em: dezembro de 2010.

FIGENER. **Estudo de Confiabilidade do Sistema Elétrico da UNIB-RS**. Documento Interno, 2008.

REIS, L. B.; SILVEIRA, S. **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. EDUSP. São Paulo, 2000.

CEPEL. **Tecnologia Eólica**. Disponível em:

< [http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20100705_Tecnologia_Eolica_\(2010_updates\).pdf](http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20100705_Tecnologia_Eolica_(2010_updates).pdf)>. Acesso em: setembro de 2010.