

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA  
E ELABORAÇÃO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO  
EM COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Elisângela Pinheiro**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

**PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E  
ELABORAÇÃO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO EM  
COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

**Elisângela Pinheiro**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção.**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Mendonça Souza**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

P654p Pinheiro, Elisângela

Previsão de consumo de energia elétrica e elaboração de modelos de otimização em cooperativa de eletrificação rural / por Elisângela Pinheiro. – 2011.

102 p. ; il. ; 30 cm

Orientador: Adriano Mendonça Souza

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2011

1. Cooperativa de eletrificação rural 2. Plano estratégico de expansão  
3. Modelos de Box-Jenkins 4. Ferramenta hierárquica de decisão 5. Otimização  
I. Souza, Adriano Mendonça II. Título.

CDU 621.311

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109  
Biblioteca Central UFSM

---

© 2011

Todos os direitos autorais reservados a Elisângela Pinheiro. A reprodução de partes ou de todo este trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: R. Dr. Liberato Salzano V. da Cunha, 435, AP.402, Camobi, Santa Maria, RS, 97105-090  
Fone (0xx) 55 9902 0527; Endereço Eletrônico: [elisangela.pinheiro@ymail.com](mailto:elisangela.pinheiro@ymail.com)

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E  
ELABORAÇÃO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO EM  
COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

elaborada por  
**Elisângela Pinheiro**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia de Produção**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Adriano Mendonça Souza, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Wesley Vieira da Silva, Dr. (PUC-PR)**

---

**Mario Luiz Santos Evangelista, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 30 de agosto de 2011.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho...*

*A Deus.*

*A meus anjos da guarda.*

*Aos meus pais pelo apoio, incentivo de sempre seguir em frente e nunca desistir de meus ideais.*

*Ao meu namorado, pelo companheirismo e pela ajuda em momentos que necessitava.*

*Aos amigos verdadeiros.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSM, pela oportunidade de crescimento intelectual e humano a qual obtive.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da sabedoria, força e coragem de ter vencido os obstáculos com garra e determinação e hoje poder estar concluindo mais uma etapa.

Agradeço ao professor orientador Adriano Mendonça Souza, pelo auxílio, pelos desafios propostos e conhecimentos disseminados durante este curto período de convivência.

Ao pai do coração Adalberto Lovato, pelo apoio, pela confiança e principalmente pelo incentivo de seguir em frente na conquista de conhecimento e ideais.

Ao professor Mário Luiz Santos Evangelista, amigo do coração, pelo auxílio, pelas horas de dedicação, sempre procurando ajudar a resolver dúvidas, incentivando a continuar a caminhada.

A minha família e amigos tão especiais pela força e incentivo em todos os momentos.

A Cooperativa de Eletrificação Rural, pela oportunidade cedida e pela colaboração constante.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e aos colegas de mestrado pela convivência, oportunidade de crescimento e pela amizade verdadeira construída durante o curso. A CAPES pelos 12 meses de auxílio financeiro.

## EPÍGRAFE

“A estrutura do problema determina a forma do algoritmo de solução”.

(LEON S. LASDON, 1970).

A sorte favorece as mentes preparadas.

(LOUIS PASTEUR).

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E ELABORAÇÃO DE MODELOS DE OTIMIZAÇÃO EM COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

AUTORA: ELISÂNGELA PINHEIRO

ORIENTADOR: ADRIANO MENDONÇA SOUZA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 30 de agosto de 2011.

A presente dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo de previsão pautando-se em um conjunto de ferramentas com base em modelos matemáticos que auxiliem uma cooperativa de eletrificação rural na tomada de decisões estratégicas de investimentos em geração frente a cenários aperiódicos futuros. Como metodologia foi utilizada a análise de séries temporais com métodos de Box-Jenkins para a construção de modelos que foram utilizados na previsão de consumo energético. Análise qualitativa de cenários futuros utilizando a metodologia de Kohler adequada a aplicações regionalizadas. Utilizou-se uma abordagem heurística e em níveis hierárquicos para definição dos parâmetros de um modelo matemático, para aplicação de programação linear inteira. A programação matemática foi usada num nível hierárquico inferior para otimizar a localização de usinas geradoras de energia elétrica por painéis fotovoltaicos em áreas de subestações e ramais visando minimizar desembolsos em geração, manutenção distribuição e operação. O modelo foi testado numa cooperativa com seis subestações, 572 ramais, cerca de 7.574 cooperados e com uma extensão em redes de 2.737 km. Como resultados foram obtidos modelos SARIMA  $(1,1,1) \times (0,1,1)$ <sub>12</sub>. No total foram previstos um aumento de 1.292 kW para as seis subestações nos próximos cinco anos, o que representa um desembolso R\$ 17.170.000,00 caso a cooperativa opte na construção de uma usina solar fotovoltaica para suprir este aumento de consumo.

**Palavras-chave:** Cooperativa de eletrificação rural, Plano estratégico de expansão, Modelos de Box-Jenkins, Ferramenta hierárquica de decisão, Otimização,



## **ABSTRACT**

Master Course Dissertation  
Pos Graduation Program in Production Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PREDICTION OF ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION AND NETWORK DISTRIBUTION WITH MATHEMATICAL MODELS APPLICATION**

**AUTHOR: ELISÂNGELA PINHEIRO**

**ADVISER: ADRIANO MENDONÇA SOUZA**

Defense Place and Date: Santa Maria, August 30<sup>nd</sup>, 2011.

This dissertation aims to build a set of tools based on mathematical models to assist a rural electrification cooperative in taking strategic decisions on investing in electrical generation in face of erratic and non-periodic future scenarios. Time series analysis using the Box-Jenkins methods for forecasting was employed to construct the models to predict future energy consumption. Qualitative analysis of future scenarios using Kohler method, that is suited to regional applications, was used. An heuristic approach with hierarchical levels was employed to define the parameters of a mathematical model for the application of integer linear programming at a lower level. This mathematical program was used to optimize the location of photovoltaic solar power plants within a transformer substation area and its branches to minimize disbursements in assets investments, and operations and maintenance costs. The model was tested in a cooperative with six substations, 572 branches, 7,574 cooperative members and a 2,737 km length network. In results obtained was SARIMA models  $(1,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ . In total, obtained an increase of 1.292 kW for the six substations in the next five years, representing a disbursement R\$ 17,170,000.00 if the cooperative to chooses to build a photovoltaic solar power plant to meet this increase of consumption.

**Key words:** Rural electrical cooperative, Strategic expansion planning, Box-Jenkins models, Hierarchical decision tool, Optimization,

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Esquema da importância da eletricidade no desenvolvimento econômico-social mundial.....	20
Figura 02 - Potência instalada nos projetos em operação, em construção e nas outorgadas no estado do RS.....	21
Figura 03 - Consumo final de eletricidade no RS, no período de 2005 a 2009 e projeção de crescimento até 2030.....	22
Figura 04 - Beneficiários com o programa Luz para Todos no Brasil.....	23
Figura 05 - Previsão de consumo de energia solar até 2035.....	24
Figura 06 - Previsões de geração de energia para países da IEA.....	25
Figura 07 - Radiação solar média registrada em 2010.....	27
Figura 08 - Sistema fotovoltaico aplicado a rede elétrica. ....	28
Figura 09 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR instalados no país (1995-2009).....	29
Figura 10 - Exemplo de comportamento de uma série temporal. ....	30
Figura 11 - Comportamento da FAC e FACP de um modelo AR (1). ....	33
Figura 12 - Comportamento da FAC e FACP de um modelo MA (1). ....	34
Figura 13 - Etapas da construção de um modelo ARIMA. ....	38
Figura 14 – Metodologia de Kohler. ....	46
Figura 15- Processo de modelagem da solução de problemas em PO. ....	51
Figura 16 - Transformação de formulações.....	55
Figura 17 - Fases de elaboração e pontos abordados na dissertação. ....	59
Figura 18 - Passos para a elaboração da previsão de consumo de energia elétrica. ....	61
Figura 19 - Passos para a elaboração da análise qualitativa de cenários de desenvolvimento da região estudada.....	63
Figura 20 - Passos para a elaboração de modelos de otimização dos possíveis investimentos.....	64
Figura 21 – Exemplo de interligações entre as planilhas. ....	67
Figura 22 – Planilha para estruturação de cálculos de desembolso na geração de energia solar fotovoltaica.....	68
Figura 23 – Ferramenta hierárquica de simulação.....	70
Figura 24 - Estrutura dos modelos de otimização de PL.....	71
Figura 25 – Estrutura dos modelos de otimização de Programação Linear Inteira no Solver. ....	72
Figura 26 – Preenchimento da janela “Parâmetros do Solver”. ....	73
Figura 27 - Localização das subestações estudadas. ....	75
Figura 28 - Consumo mensal de eletricidade. ....	76
Figura 29 - ACF e ACFP das subestações em nível.....	78
Figura 30 - FAC e FACP dos resíduos da série de consumo com eletricidade das seis subestações da CERTHIL.....	80
Figura 31 - Ferramenta hierarquizada de simulação em investimentos de geração elétrica fotovoltaica.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Sistemas Instalados no Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM)..	26
Tabela 02 - Preço da geração de energia elétrica por diversas fontes e as perspectivas de redução de custos.....	29
Tabela 03 - Resultado do teste de estacionariedade das séries.....	77
Tabela 04 - Características dos modelos propostos de previsão. ....	79
Tabela 05 - Estimativa de consumo energético de 2011-2015 da CERTHIL, RS. ....	81
Tabela 06 - Crescimento anual da população da área Urbana e Rural do Noroeste Gaúcho em %.....	82
Tabela 07 - Evolução do PIB nos municípios da região noroeste do RS de 2003 a 2010.....	83
Tabela 08 - Evolução do PIB <i>per capita</i> de 1999 a 2008 dos seis municípios estudados.....	84
Tabela 09 - Perspectiva de consumo em kW das subestações da cooperativa nos próximos 5 anos.....	86
Tabela 10 – Desembolso proposto para gerar kW previsto.....	88
Tabela 11 - Resultados de simulações de desembolsos nas subestações e ramais no solver. ...	89

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Problema de Pesquisa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>18</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	18
1.3.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 Energia</b> .....	<b>19</b>
2.1.1 Energia Elétrica .....	19
2.1.2 Energia Solar .....	23
2.1.3 Sistema Fotovoltaico Aplicado a Rede Elétrica .....	27
<b>2.2 Análise de Séries Temporais</b> .....	<b>30</b>
2.2.1 Modelos de previsão .....	31
2.2.1.1 Modelos Estacionários.....	32
2.2.1.2 Modelos não estacionários .....	35
2.2.1.3 Modelos Sazonais .....	36
2.2.2 Etapas da Metodologia Box e Jenkins.....	38
2.2.2.1 Testes de raiz unitária .....	40
2.2.2.2 Testes de normalidade .....	42
2.2.2.3 Testes de autocorrelação.....	43
2.2.3 Aplicações modelos de séries temporais no setor de energia elétrica .....	44
<b>2.3 Análise de Cenários</b> .....	<b>45</b>
2.3.1 Região Fronteira Noroeste atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural.....	47
2.3.1.1 Dados socioeconômicos .....	48
2.3.2 Aplicação de cenários no setor energético. ....	49
<b>2.4 Pesquisa Operacional</b> .....	<b>50</b>
2.4.1 Modelos de Pesquisa Operacional e modelos de otimização .....	51
2.4.2 Formulação de modelos de Programação Linear .....	54
2.4.3 Aplicações de PL na otimização de sistemas elétricos.....	56
<b>3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>58</b>
<b>3.1 Primeira Fase da Pesquisa: Modelagem inicial de consumo</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2 Segunda Fase da Pesquisa: Análise qualitativa de cenários futuros</b> .....	<b>62</b>
<b>3.3 Terceira Fase da Pesquisa: Alternativas de distribuição de fontes geradoras.</b> .....	<b>63</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
<b>4.1 Empresa de Eletrificação Rural: histórico</b> .....	<b>74</b>
<b>4.2 Modelos de Previsão de consumo de energia elétrica</b> .....	<b>75</b>
4.2.1 Etapa de Identificação .....	76
4.2.2 Etapa de Estimção.....	78
4.2.3 Etapa de Verificação.....	79
4.2.4 Etapa de Previsão.....	81
<b>4.3 Cenários de desenvolvimento regional: análise qualitativa</b> .....	<b>82</b>
4.3.1 Perspectivas de mudanças nos seis municípios em estudo.....	85
<b>4.4 Desenvolvimento de modelos de otimização de redes de distribuição e suprimento do consumo de energia</b> .....	<b>86</b>
4.4.1 Alternativas de suprimento de energia .....	86
4.4.2 Obtenção dos valores utilizados nos cálculos de otimização .....	87

4.4.3	Elaboração da ferramenta hierarquizada de simulação .....	88
4.4.4	Síntese de resultados obtidos no solver .....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O setor energético mundial vem passando por transformações, tanto a nível econômico, quanto político e principalmente ambiental.

Observa-se que o contraste entre o aumento do consumo de energia decorrente principalmente do crescimento econômico dos países em desenvolvimento, atrelado a escassez dos recursos energéticos mais utilizados atualmente, bem como a preocupação com a degradação ambiental gerada pela própria extração e aplicação de tais recursos, tem incentivado a busca por novas fontes de energias limpas e de caráter renovável, principalmente solar e eólica (ARSEGO et. al., 2007).

A emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), aliada a crises energéticas tem sido responsáveis pela mudança no cenário de geração de energia elétrica. A reação de alguns países industrializados ao desastre de Fukushima em abril de 2011 e as críticas à construção de grandes usinas hidrelétricas, de grande impacto ambiental, reforça uma tendência ao desenvolvimento de fontes limpas e renováveis como a eólica e a solar.

Frente essas mudanças, é necessário uma reestruturação do sistema energético com fornecimento de energia de qualidade, estável, segura e com minimização dos custos para o consumidor. Logo, a previsibilidade de demanda, o estudo de disponibilidade e viabilidade de recursos energéticos renováveis para diferentes localidades e em diferentes épocas do ano é de grande interesse para o setor (CAMPOS, 2008).

Assim como os ventos, a radiação solar constitui uma fonte gratuita e teoricamente inesgotável de energia. Essa forma pode ser convertida em energia térmica, química ou elétrica. A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através da utilização de painéis fotovoltaicos, constituídos por células solares que produzem uma diferença de potencial elétrico pela ação dos fótons da radiação.

Enquanto as usinas hidrelétricas e eólicas devem ser situadas em pontos geográficos bem definidos, a energia solar apresenta a possibilidade de ser instalada em qualquer localização e com qualquer capacidade de geração. Essa característica, conforme Cramer (2010), trás ainda a vantagem de utilizar as redes de distribuição já existentes.

Existe um grande número de estudos que dizem respeito à otimização dos investimentos em geração e distribuição de energia elétrica aplicada a usinas hidrelétricas

(PEREIRA e PINTO, 1991; MÉLLO JÚNIOR e MATOS, 1999; DAVID et. al., 2000; CAI et. al., 2001; SILVA JÚNIOR et. al. 2003; GRANVILLE et.al., 2004 e DIAS et. al., 2010).

Esses estudos enfatizam a complexidade do problema tanto pela quantidade de variáveis como imprevisibilidade de seus valores futuros. Não apresentam um algoritmo único, pois, são precedidos da construção de modelos de previsão e depois hierarquizados com níveis superiores heurísticos e níveis inferiores com modelos de programação matemática aplicados aos subsistemas.

A utilização de métodos de Pesquisa Operacional (PO) é ampla, como programação linear inteira, programação não linear, programação dinâmica estocástica e, mais recentemente, programação genética (TAGLIALENHA, 2008).

O trabalho seminal de Lasdon (1970) indica caminhos para resolver problemas de grande escala. Também o trabalho pioneiro de Monticelli (1975) deu início no Brasil a um grande número de estudos relacionados a otimização da transmissão de energia elétrica. Cabe mencionar a tese de Taglialenha (2008) que apresenta, ainda com base nos conceitos de Lasdon, um modelo hierarquizado de heurística num nível superior e otimização matemática nos níveis inferiores.

Os estudos acima citados consideram o sistema brasileiro de geração de energia, preponderantemente hidrelétrico, com localização geográfica fixa de geração. A energia solar por outro lado, apresenta a flexibilidade de instalação em qualquer ponto geográfico e com qualquer capacidade de geração. Essa flexibilidade proveitosa e útil sob o ponto de vista prático, por outro lado, eleva ainda mais a complexidade da modelagem e construção de algoritmos de otimização do problema.

Por essa razão, a presente dissertação retorna ao conceito inicial de Lasdon de hierarquizar o modelo de decisão e utiliza o que Taglialenha (2008) chama de metaheurística, ou seja, “algoritmos que coordenam heurísticas mais simples como uma busca local, com o propósito de encontrar soluções de melhor qualidade do que as obtidas utilizando as heurísticas isoladamente” (TAGLIALENHA, 2008 p.17).

A organização deste trabalho é composta por seis capítulos. No capítulo 1 apresenta-se a contextualização do estudo, dando as coordenadas para a evolução da pesquisa como os objetivos, hipóteses, métodos utilizados e a justificativa da realização da pesquisa.

No Capítulo 2 aborda-se a revisão bibliográfica: energia elétrica, energia solar, modelos de previsão, cenários, modelos de programação linear inteira e demais assuntos que servem de base para o desenvolvimento desta pesquisa.

O Capítulo 3 reporta a metodologia que conduziu o desenvolvimento deste trabalho, descrevendo de uma forma detalhada às etapas abordadas para alcançar os objetivos propostos.

No Capítulo 4 enfoca-se uma descrição dos dados obtidos e resultados que permitem compreender os efeitos dos mesmos para com os objetivos propostos neste estudo.

No Capítulo 5 expõem-se as análises conclusivas da pesquisa por meio da verificação dos objetivos, se os mesmos foram ou não atingidos e em seguida são apresentadas algumas considerações à continuação do estudo.

E por fim, são descritas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação. Todos os cálculos utilizados na elaboração e simulação da ferramenta e demais resultados, encontram-se no CD em anexo.

## **1.1 Problema de Pesquisa**

Tendo em vista o que foi abordado até o momento, pode-se definir como problema da pesquisa o seguinte questionamento: quais modelos de previsão e otimização podem auxiliar as Cooperativas de Energia Elétrica na tomada de decisões estratégicas de investimentos frente a cenários alternativos?

## **1.2 Justificativa**

A matriz de geração de energia elétrica das cooperativas de eletrificação rural localizadas no noroeste do RS apresenta uma preponderância absoluta de usinas hidrelétricas de pequeno porte. A razão deste predomínio está no baixo custo de geração e na disponibilidade de quedas d'água em afluentes do rio Uruguai. Economicamente, a razão está na capacidade financeira limitada para investimentos.

A implantação de uma unidade hidrelétrica acarreta perturbações ambientais com o alagamento de grandes áreas, que na sua grande maioria são agricultáveis. E mais do que isso, no caso da região em foco caracterizada por módulos rurais de pequeno porte, implica no deslocamento de famílias que fazem da agricultura seu modo de vida.



Portanto, a cooperativa buscar novas fontes alternativas de geração energética e uma delas é a fotovoltaica, pois para a construção de uma usina hídrica com capacidade de 2MW são necessários alagar 20 hectares de áreas agricultáveis. No caso da cooperativa em questão foram alagados 14 hectares para gerar 1.4 MW (WILLERS, 2010). Já uma usina solar fotovoltaica para gerar os mesmos 2MW são necessários alagar apenas 2 hectares.

A implantação de uma usina hidrelétrica demanda também investimentos que só são viáveis pela maior parte das cooperativas com ônus dos encargos de grandes financiamentos. Uma usina hidrelétrica é uma fonte geradora centralizada, o que exige também as linhas de transmissão de maior capacidade. E, nesse ponto, considera-se que o custo de implantação aumente exponencialmente com sua capacidade. Analisa-se também os custos maiores de manutenção e de capacitação do pessoal que realiza esta tarefa.

Outra alternativa é a energia solar ou fotovoltaica. Neste campo de pesquisa, o desenvolvimento tecnológico de painéis fotovoltaicos tem permitido ganhos significativos na sua eficiência. No início da década de 90, esta vantagem era limitada até 13%. Hoje, já é possível se obter comercialmente painéis com eficiência de 18%, ou seja, um incremento de 38%. Existem projeções para 23% de eficiência em painéis comerciais num horizonte de dois anos, o que em alguns países como a China significa obter energia elétrica a partir do sol com o mesmo custo da grade atualmente existente.

Quanto à localização não há exigências, e por isso, podem estar situadas mais próximas dos locais de consumo. Essa menor distância reduz a necessidade de redes de distribuição mais complexas e de maior porte, mais ainda, as unidades de energia solar podem ser fragmentadas e distribuídas de modo a otimizar critérios de eficiência de transmissão ou de retorno de investimentos.

De acordo com Duarte (2004), assim como a fotovoltaica, a energia eólica é uma alternativa limpa e de baixo impacto ambiental para a produção de energia elétrica. Esta fonte vem em constante crescimento mundial principalmente na Europa, com incentivos de governos, instituições motivadoras e sociais cativados principalmente pelo aspecto ambiental. “A geração direta de uma energia elétrica a partir do vento compensa a combustão de três unidades de combustível fóssil que abastece uma usina térmica a carvão convencional”.

Essa transformação ou evolução de fontes hídricas para solares e eólicas requer estudos que otimizem critérios de eficiência, segurança, confiabilidade e de retorno de investimentos. Uma forma de atender esses requisitos é a construção de modelos matemáticos que conduzam à devida otimização. E, por fim, a construção destes modelos exige a obtenção dos necessários parâmetros, inclusive de consumo a partir de métodos estatísticos.

### 1.3 Objetivos

Uma dissertação de Engenharia de Produção deve visar uma efetiva contribuição à sociedade de forma geral, portanto, esta dissertação contempla os processos de decisão estratégica de uma Cooperativa de Eletrificação Rural.

Neste item descrevem-se o objetivo geral e os específicos que nortearão este estudo a Cooperativa de Eletrificação Rural do Noroeste do Estado do RS.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral elaborar um conjunto de modelos de previsão e otimização que auxilie Cooperativas de Energia Elétrica na tomada de decisão estratégica de investimentos em energia solar fotovoltaica frente a cenários alternativos.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a. Analisar o comportamento de consumo energético dos últimos 11 anos em seis subestações de uma Cooperativa de Eletrificação Rural;
- b. Projetar a evolução do consumo para um horizonte de cinco anos;
- c. Realizar análise qualitativa de cenários de desenvolvimento dos municípios atendidos pela cooperativa;
- d. Elaborar uma ferramenta que auxilie na identificação de pontos potenciais de suprimento de energia através de redes alternativas fotovoltaicas.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo aborda a contextualização teórica utilizada no desenvolvimento deste estudo. Primeiramente apresenta-se uma visão geral do histórico da energia elétrica e solar quanto sua evolução histórica, produção, capacidade instalada e consumo. Após, um contexto de previsão sob a ótica do consumo de energia elétrica. Na sequência são discutidos os modelos de previsão, seguindo um aprofundamento acerca dos modelos exponenciais, incluindo Box – Jenkins / Sazonal Autoregressivo Integrado de Médias Móveis (SARIMA), muito utilizados na previsão de consumo energético. Além de uma explanação sobre cenários econômicos, constando de metodologia de construção, tipos e análise qualitativa de cenários de desenvolvimento da região noroeste do Rio grande do Sul - RS. E, por último, enfatiza-se a utilização da Pesquisa Operacional no desenvolvimento de modelos de otimização de sistemas elétricos.

### **2.1 Energia**

#### **2.1.1 Energia Elétrica**

A energia elétrica, desde a segunda metade do século XIX, vem contribuindo e alavancando o desenvolvimento da sociedade. Ocupa lugar de destaque no crescimento econômico-social de qualquer país.

A facilidade de transporte e a propriedade de ser transformada tornaram-na fator preponderante na produtividade e bem estar de toda a sociedade moderna (Figura 01). Esta, por tanto, se tornou dependente de seu fornecimento e suscetível às falhas dos sistemas elétricos (LEÃO, 2011).

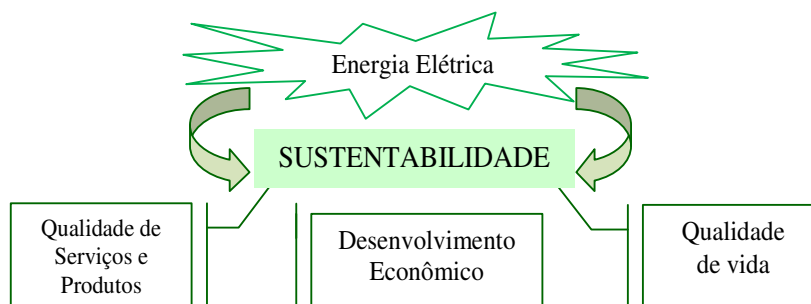


Figura 01 - Esquema da importância da eletricidade no desenvolvimento econômico-social mundial

Fonte: Adaptado de Leão, 2011.

Para Leão (2011), em consonância com Capeletto e Moura (2010), o aumento do consumo de energia está ligado ao crescimento da economia e da população mundial, onde há previsibilidade que até 2030 os maiores consumidores de energia serão os países em desenvolvimento não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE<sup>1</sup>).

Ciente do aumento no consumo de energia busca-se por meio de fontes renováveis chegar a uma produção suficiente com a disposição de sistemas que controlem a produção de forma que se obtenha energia necessária para atender a demanda, as perdas de produção e de transporte (KAGAN, et. al., 2005; OLIVEIRA, 2009).

O setor de geração de energia elétrica no Rio Grande do Sul (RS) compreende 121 empreendimentos e apresenta uma potência instalada de 7.150.078 kilowatts (kW) . Deste total instalado, 95,42% são provenientes de Usinas Hidrelétricas (UHE), Usinas Termoelétricas (UTE) e Usinas Eólicas (EOL), e 4,58 % são representados pelas demais usinas hídricas e termoelétricas.

Das 121 usinas que o estado apresenta apenas 11 encontra-se em operação, 32 estão outorgadas desde o período de 1998 a 2004 e ainda não foram construídas e 78 apresentam-se em construção (Figura 02). As usinas em operação geram um total de 7.150.078 kW de potência, as que estão em construção (correspondem apenas as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), UHE e UTE) se almeja gerar 1.430.219 kW e para as outorgadas

<sup>1</sup> De acordo com Capeletto e Moura, 2010, fazem parte da OCDE 30 países, a saber: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia, Suíça e Turquia.

espera-se produzir 2.287.250 kW, estimando-se uma capacidade futura no estado de 10.867.547 kW.

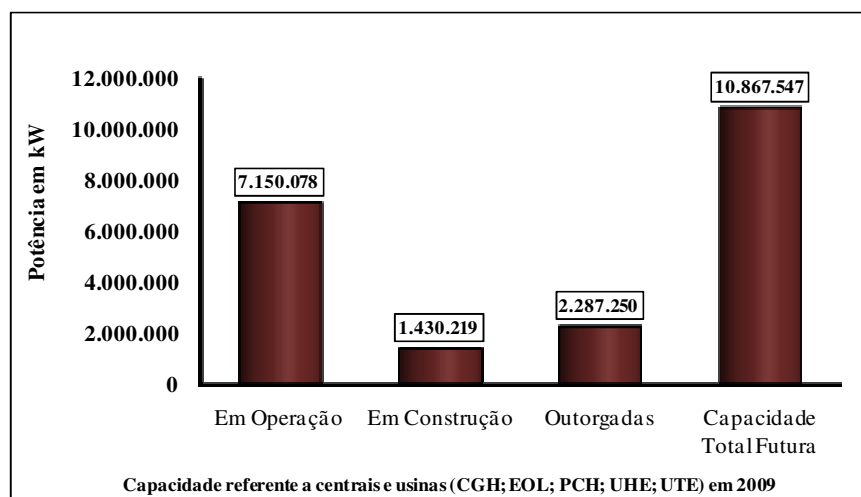


Figura 02 - Potência instalada nos projetos em operação, em construção e nas outorgadas no estado do RS.

Fonte: Adaptado de Capeletto e Moura. 2010.

No RS, o consumo final de eletricidade em 2010 foi de 25.317.457 megawatts hora – (MWh), aproximadamente 2.177 mil toneladas equivalente de petróleo ( $tep^2$ ), valor este, equivalente a 15,75% do consumo final em 2009. Se comparado com 2008, houve decréscimo no consumo de 0,46%. Percebe-se na Figura 03, numa suposta projeção de consumo energético para o período de 2010 a 2030 com taxas de crescimento de 2,6% e de 5%, que a estimativa de consumo será de 70.533.488 MWh e 43.402.491 MWh respectivamente.

<sup>2</sup> Para a *IEO 2009* a unidade btu, que aqui foi convertida para TEP (Tonelada Equivalente de Petróleo), considerando-se que  $1tep=39.680.000$  btu. Mesmo sendo o Joule a unidade do sistema métrico internacional de energia, emprega-se em balanços energéticos a unidade tep, pois em Joule os valores seriam muito grandes.

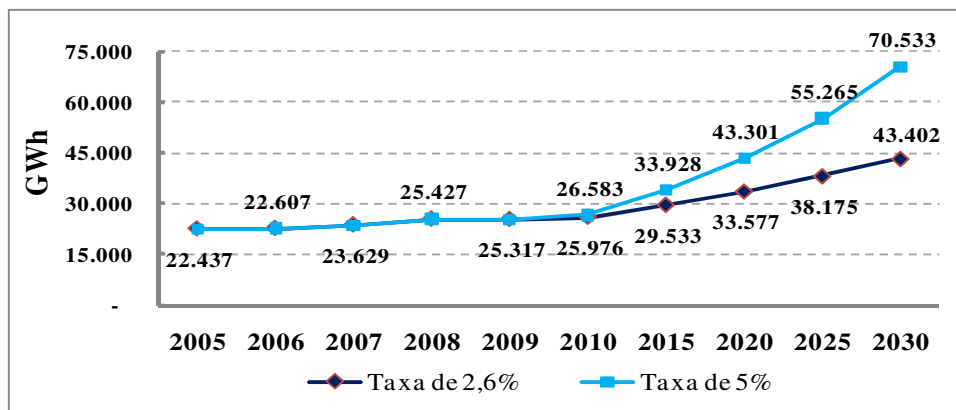


Figura 03 - Consumo final de eletricidade no RS, no período de 2005 a 2009 e projeção de crescimento até 2030.

Fonte: Adaptado de Capeletto e Moura, 2010.

Inquestionavelmente hoje a energia é indispensável na vida humana, mas sua disponibilidade não é suficiente para manter e criar novas condições para o crescimento econômico. A nível mundial, estimava-se que em 2009, 20% da população mundial não tinha acesso a energia elétrica, sendo que 85% destas pessoas viviam em áreas rurais. Portanto, o acesso a eletricidade tem sido prioridade dos governos vigentes, em específico a países mais carentes, na qual trabalha-se na criação de programas de eletrificação rural e agências de eletrificação nacional, no controle mais preciso das necessidades no desenvolvimento da eletrificação rural (*World Energy Outlook (WEO)*, 2010).

Um dos programas é o LUZ PARA TODOS do governo brasileiro que de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2010) tem por objetivo tirar 13 milhões de pessoas da escuridão. A região Nordeste foi a que mais se destacou com 6,5 milhões de beneficiados. A região Sul no momento da pesquisa, contava com cerca de 997 mil. (Figura 04).

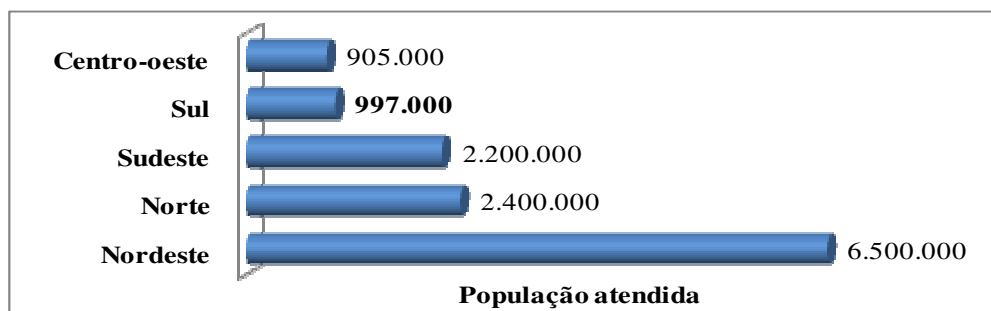


Figura 04 - Beneficiados com o programa Luz para Todos no Brasil.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL- Programa “LUZ para TODOS”, 2004.

As cooperativas de eletrificação rural contribuem de forma significativa no desenvolvimento e progresso do meio rural. No RS, elas abastecem cerca de 240 mil gaúchos (57 mil Km de redes) em 358 municípios dos 496 existentes e dispõem de um parque gerador de 21 usinas que geram 25% do que se consome. Desde 2005 treze cooperativas participam do programa Luz para Todos, atendendo 17 mil propriedades, com a pretensão de até o final do programa atingir 20 mil. A cooperativa três-maiense (CERTHIL) desde o início do programa beneficiou aproximadamente 700 famílias na região Noroeste do RS (CERTHIL, 2009).

### 2.1.2 Energia Solar

As aplicações de energia fotovoltaica surgiram a partir do final do século XIX em fotômetros para máquinas fotográficas. Em 1958 utilizou-se células solares como *backup* às pilhas químicas usadas nos satélites espaciais, sendo melhorada sua eficiência no período de 1960 a 1969, com suas primeiras aplicações terrestres em sistemas de telecomunicações remotas e bóias de navegação. Em 1982 foi construída a primeira grande central solar na Califórnia com capacidade de (1MW). Em 1990 na Alemanha houve a implantação de 100.000 telhados solares. Em 1993 implantou-se no Japão 70.000 telhados solares e em 2001 ocorreu o primeiro vôo de um avião de energia solar (PROENÇA, 2007).

A produção de energia solar varia quanto ao clima. Apresenta esta característica em virtude de que sua produção ocorre somente durante o dia, permitindo gerar energia de apoio

ao consumo nas horas de pico seja ela do comércio, da indústria e residencial (PROENÇA, 2007; QUAGLIA, 2010).

Mundialmente a capacidade instalada é destacada pela Alemanha, Japão, EUA e Espanha que em 2007 produziram um total de 7.841 megawatts de potência (MWp). Juntos são responsáveis por 90% do total instalado, sendo 50% somente produzido pela Alemanha que possui a maior capacidade instalada com 3.862 MW. Em segundo lugar apresenta-se a Espanha com 537 MW, depois Japão com 210MW e EUA com 206 MW (JANNUZZI; VARELLA ; GOMES, 2009).

A aplicação de sistemas fotovoltaicos no mundo obteve um grande crescimento por volta da década de 90. De 2007 em diante a produção de energia solar segue com crescimento positivo e com destaque nos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD, (Figura 05).

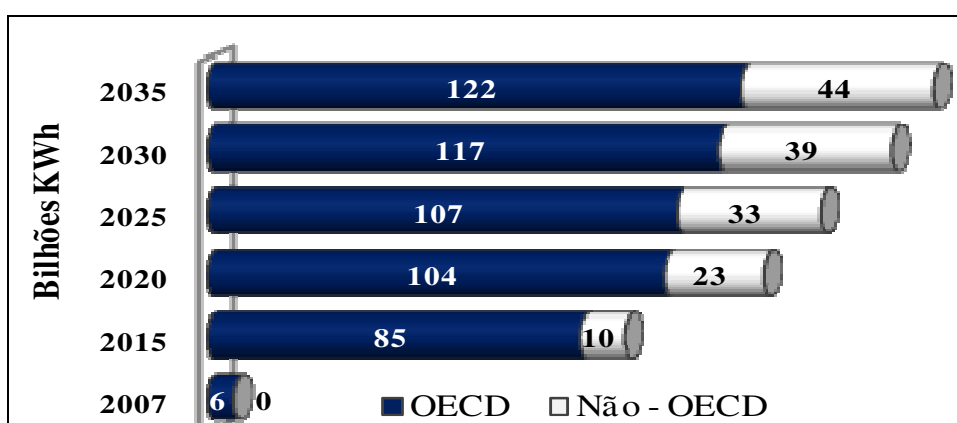


Figura 05 - Previsão de consumo de energia solar até 2035.

Fonte: Adaptado de *International Energy Outlook*( IEO), 2010.

O avanço na indústria fotovoltaica ocorreu principalmente a partir da década de 90 em função de políticas públicas desenvolvidas em muitos países, através da Legislação de Sistemas Fotovoltaicos, responsável pela regularização e fornecimento de subsídios no desenvolvimento desta fonte energética, além da redução de custos que torna a energia fotovoltaica atrativa. Em 2006 a redução chegou a ser oito vezes inferior que no ano de 1975. As previsões indicam uma redução ainda maior a ponto de se tornar competitiva em relação às tarifas obtidas por consumidores de sistemas convencionais de geração de eletricidade



(JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009). Observa-se que a médio e longo prazo a energia fotovoltaica apresente uma produção significativa, fato esperado pela Associação Internacional Européia (IEA). Conforme Figura 06.

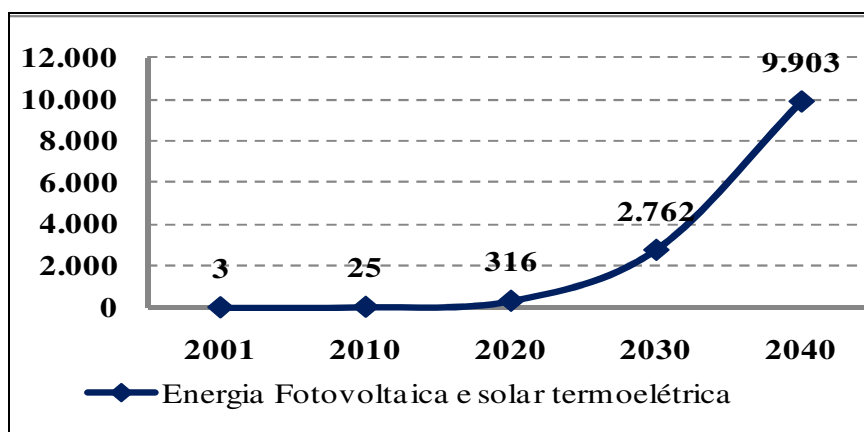


Figura 06 - Previsões de geração de energia para países da IEA.

Fonte: Adaptado de *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup>* (REN21), 2010.

Estima-se que em 2020, 1% de toda a eletricidade mundial consumida seja de energia fotovoltaica, e em 2040, numa previsão otimista e ousada, este consumo suba para 26%, com uma produção de 9.903 terawatts (TW).

Mas acredita-se que uma quantidade maior de energia solar seja consumida antes de 2020, pois este setor vem se destacando muito rapidamente nos países europeus e asiáticos. Em 2009 a indústria de energia solar mundial faturou US\$ 38 bilhões. Em que Alemanha, Itália e República Checa lideram a produção mundial, mas países asiáticos também tiveram bons desempenhos. O Japão obteve um crescimento de 109% e praticamente a metade da produção de células solares são desenvolvidas na China e em Taiwan (REN21, 2010).

A América do Sul timidamente vem estudando a possibilidade de implantação desta fonte renovável. O Brasil possui um grande potencial de irradiação solar, superior ao dobro provido pela Alemanha, país líder de sistemas fotovoltaicos em capacidade instalada (JANNUZZI, VARELLA e GOMES, 2009).

Quanto à produção fotovoltaica o Brasil apresenta resultados inferiores. Estima-se que no país a potência total instalada de sistemas fotovoltaicos seja de 20 MW, destes 70% localizam-se na região Norte, Nordeste e Centro-Oeste (ZILLES, 2011). Deste percentual

apenas 0,153 megawatts de potência (MWp) são de sistemas conectados a rede elétrica. O que demonstra um grande potencial de estudo e investimento neste setor.

Tradicionalmente os sistemas que mais são utilizados no país são para eletrificação rural e bombeamento de água que atendem cargas distantes da rede elétrica convencional (JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009). A energia total gerada pelos sistemas instalados no Brasil é de 5.224,5 kilowatts de potência (kWp), conforme observado na Tabela 01.

Tabela 01 - Sistemas Instalados no Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM).

<b>SISTEMAS INSTALADOS NO PRODEEM</b>	
<b>Sistemas</b>	<b>Potência / KW<sub>p</sub></b>
Eletrificação rural	3.850,00
Bombeamento de água	1.350,00
Iluminação pública	24,50
<b>TOTAL</b>	<b>5.224,50</b>

Fonte: Adaptado de GALDINO e LIMA, 2002 *apud* JANNUZZI; VARELLA ; GOMES, 2009.

O PRODEEM, entre 1996 e 2001 foi responsável pela instalação de 5,2 MW, ¼ da capacidade instalada pelos sistemas autônomos fotovoltaicos do país que gerou cerca de 20 MW (GALDINO e LIMA, 2002 *apud* JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009).

O programa solar brasileiro pretende entre 2012 e 2013 apresentar preços equivalentes entre energia fotovoltaica e convencional em algumas partes do país. Simulações estão sendo realizadas pelo laboratório de energia solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Labsolar/UFSC), onde se busca atingir um modelo excelente que seja viável ao consumidor final (REIS, 2008).

No RS o uso da energia solar fotovoltaica é pequeno, pois esta tecnologia ainda apresenta um custo elevado na implantação dos painéis de captação. Embora o estado tenha uma média de insolação diária superior a Região Norte (em torno de 6 horas).

Alguns projetos de energia fotovoltaica voltados ao ensino são desenvolvidos pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde são realizados ensaios, calibrações, montagens e instalações (UFRGS, 2011).

O potencial de geração de energia fotovoltaica no RS é de aproximadamente 6.289.787,98 MWh/km<sup>2</sup>. Neste caso Capeletto e Moura (2010) apresentam uma simulação

com uma conversão de 15% da energia irradiada para a energia elétrica, tendo 0,01% da área total do RS (282.062Km<sup>2</sup>) coberta com coletores solares 1J = 277,77 x 10<sup>-9</sup> kWh.

De acordo com dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) de Santa Maria a região central registrou uma média de radiação em 2010 entre 2300 a 6420 Wh/m<sup>2</sup>, conforme a Figura 07.

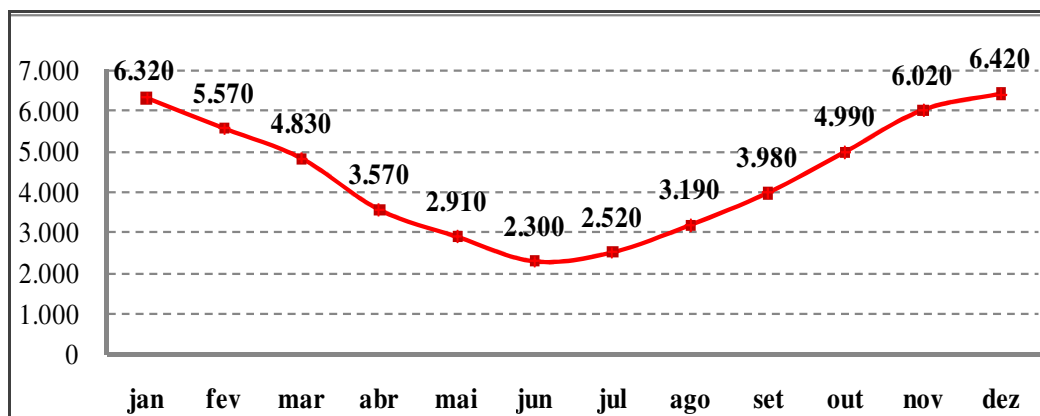


Figura 07 - Radiação solar média registrada em 2010.

Fonte: CPTEC, 2011.

Energia esta que pode ser captada, armazenada e distribuída nas redes convencionais de energia elétrica. Este potencial energético precisa ainda ser lapidado com novas pesquisas inovadoras e com sua socialização junto às empresas e a comunidade em geral.

### 2.1.3 Sistema Fotovoltaico Aplicado a Rede Elétrica

Existem duas configurações distintas de sistemas fotovoltaicos integrados a rede elétrica: os distribuídos e os centralizados (RÜTHER et. al. 2008). Estes sistemas são geradores fotovoltaicos e ou módulos voltaicos com um inversor conectado a rede elétrica, da qual converte corrente contínua (CC) (geração fotovoltaica) em corrente alternada (CA) adequada à rede de distribuição elétrica (OLIVEIRA, 2002; ZILLES, 2011), conforme esquema demonstrado na Figura 08.

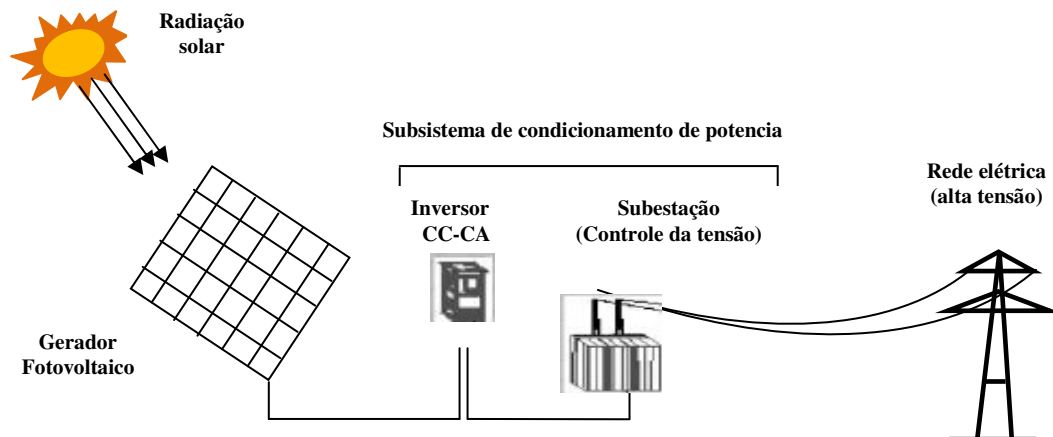


Figura 08 - Sistema fotovoltaico aplicado a rede elétrica.

Fonte: Adaptado de Macedo, 2006 e Quaglia, 2010.

O sistema de distribuição fotovoltaico integrado pode ser instalado junto ao ponto de consumo, já o sistema centralizado é semelhante a uma usina central geradora convencional, distante do ponto de consumo (RÜTHER *et al.*, 2008).

Para a European Union (2007), a energia de sistemas fotovoltaicos conectados a rede serão competitivas na Europa entre 2010 a 2020 com a tarifa oferecida ao consumidor, e em 2030 atingirá um custo médio de geração significativo. Em 2007 a produção energética fotovoltaica foi de 94% do total instalado, apenas 6% corresponde a sistemas não conectados à rede. No Brasil há 32 sistemas fotovoltaicos experimentais conectados a rede elétrica que equivalem a uma produção de 171,5 kW. Vide Figura 09.

ANO DE INSTALAÇÃO	
	1995-2000
Sistema fotovoltaico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Companhia Elétrica de São Francisco (CHESF);</li> <li>- Lab Solar (UFSC);</li> <li>- Laboratório Solar Fotovoltaico (LSF (IEE/USP));</li> <li>- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPEE /UFRJ);</li> <li>- Grupo FAE/UFPE (F. Noronha);</li> <li>- Centro de Conveniência UFSC.</li> </ul> Juntas apresenta uma produção total de 18,40 kWp.
	2001-2005
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LSF (IEE/USP);</li> <li>- ( Labsolar/CEPEL);</li> <li>- HR (RS);</li> <li>- Grupo FAE - UFPE (F. Noronha);</li> <li>- CELESC (3x 1,4 kWp);</li> <li>- LSF-IEE/USP;</li> <li>- UFRGS;</li> <li>- Centro de Cultura e Eventos UFSC;</li> <li>- CEMIG;</li> <li>- Escola Técnica de Pelotas;</li> <li>- LSF-IEE/USP;</li> <li>- Grupo FAE – UFPE;</li> <li>- C Harmonia (SP).</li> </ul> Com uma produção total de 64,10 kWp.
	2006-2009
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Casa eficiência ELETROSUL;</li> <li>- CEMIG (3 x 3 kWp);</li> <li>- UFJF;</li> <li>- GREENPEACE (SP);</li> <li>- Grupo FAE-UFPE;</li> <li>- Residência Particular, Recife;</li> <li>- Lh2 Projeto CPFL;</li> <li>- Residência Particular, São Paulo;</li> <li>- Solaris, Leme/SP;</li> <li>- Zepini, Motor Z;</li> <li>- Zepini, Fundação Estrela;</li> <li>- ELETROSUL.</li> </ul> Com produção de 89,0 kWp.

Figura 09 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR instalados no país (1995-2009).

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2002.

Observa-se que o país ainda é principiante neste sistema, mas nos últimos anos houve um aumento em iniciativas num possível mercado fotovoltaico brasileiro (SALAMONI, 2009). O custo de geração fotovoltaica aplicada à rede elétrica ainda não é viável economicamente sendo de seis a sete vezes maior que a do setor elétrico se comparado com as tarifas pagas hoje pelos consumidores (REIS, 2008; JANNUZZI, VARELLA, GOMES, 2009). Para Salamoni (2009), fora do contexto brasileiro o SFCR, tem crescido significativamente em termos de potência instalada, com boas perspectivas de redução de custo de produção (Tabela 02).

Tabela 02 - Preço da geração de energia elétrica por diversas fontes e as perspectivas de redução de custos.

<b>Preço da geração elétrica (€ cents/ kWh)</b>	<b>2005</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>
Combustíveis Fósseis (carvão/gás)	4 – 4,5	6 – 7	6,5 -9
Nuclear	4 – 6	3,5 – 7	3,6 – 6
Eólica	9 – 7,5	6 – 5	3 – 4
Solar Térmica	17	6	3
Solar Fotovoltaica	20 – 40	5 - 10	3 – 6

Fonte: Adaptado de Salamoni, 2009.

De acordo com Salamoni (2009) que faz um comparativo com preços de geração de diferentes fontes geradoras de energia, observa-se que de 2030 a 2040 a energia eólica e solar se tornará competitiva.

Apesar de pouca geração no Brasil e no Estado do RS, existem boas perspectivas de geração apresentadas pelos países Europeus, Asiáticos e Norte Americanos. A cooperativa em estudo vem estudando em seu planejamento estratégico de 2011-2015 a possibilidade de implantação de placas fotovoltaicas conectadas a rede elétrica para aumentar sua geração própria de energia. Foi aplicado modelos de séries temporais com objetivo de obter uma previsão de consumo neste mesmo período, conforme pode ser acompanhado na seção 2.2.

## 2.2 Análise de Séries Temporais

Segundo Morettin e Toloi (1987), séries temporais são conjuntos de observações ordenadas no tempo, são basicamente compostas por quatro elementos: tendência, sazonalidade, ciclo e ruído aleatório ou erro. O modelo clássico de série temporal pode ser descrito com modelos aditivos ou modelos multiplicativos de acordo com as equações (01) e (02). Respectivamente.

$$Z_t = T_t + S_t + C_t + \varepsilon_t \quad (01)$$

$$Z_t = T_t \times S_t \times C_t \times \varepsilon_t \quad (02)$$

Em que  $t = 1, 2, 3, \dots, n$  observações;  $T_t$  é a tendência no instante  $t$ ;  $S_t$  é a sazonalidade no instante  $t$ ;  $C_t$  é o ciclo no instante  $t$  e  $\varepsilon_t$ .

A tendência verifica o sentido de deslocamento da série ao longo do tempo pode ser horas, dia, semana, mês, ano, décadas, entre outros. A sazonalidade refere-se ao movimento ondulatório de curta duração, em geral, inferior a um ano, relacionada na maioria dos casos, com mudanças climáticas. O ciclo representa movimentos ondulatórios com períodos longos, superiores a um ano. O resíduo compreende a variabilidade intrínseca dos dados e estes não podem ser modelados, apenas analisados para ver sua interferência no resultado final da previsão (MORETTIN e TOLOI, 1987; PACHECO e SILVA 2003). Na Figura 10, pode ser observado o comportamento que uma série pode apresentar.

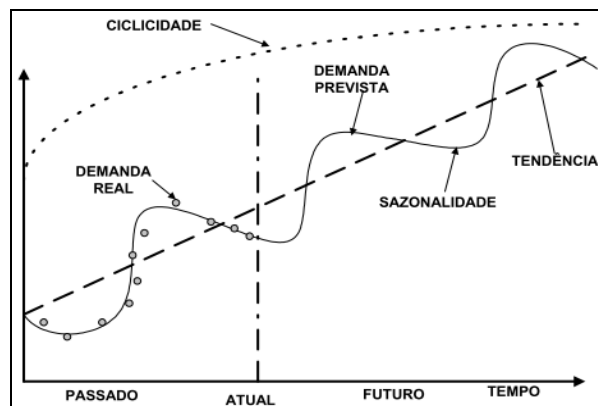


Figura 10 - Exemplo de comportamento de uma série temporal.

Fonte: Adaptado de Davis, Aquilano e Chase (2001).

O comportamento futuro de modelos de previsão de séries temporais pode ser entendido por meio do seu próprio comportamento no passado (PINDYCK; RUBINFELD, 2004). Contudo, outros autores acreditam que séries macroeconômicas modernas não apresentam componentes além de sazonal (GRANGER e NEWBOLD, 1977 *apud* PACHECO e SILVA, 2003).

Na identificação do comportamento é possível extrapolar o padrão identificado e prever o evento futuro. Nesta escolha leva-se em conta o comportamento dos dados quanto à estacionariedade, tendência e sazonalidade, ou dados que apresentam dois comportamentos com tendência e sazonalidade (MONKS, 1987; PACHECO e SILVA, 2003 e MILÉSKI JÚNIOR, 2007).

Quando removidas as componentes  $T_t$  e  $S_t$ , sobra a componente residual  $\varepsilon_t$ . A componente  $\varepsilon_t$  é considerada como sendo um processo estocástico aleatório em alguns casos, também um processo estacionário, com média zero e variância constante (MORETTIN; TOLOI, 1981; MONKS, 1987).

### 2.2.1 Modelos de previsão

De acordo com o comportamento apresentado pela série, existe um modelo mais adequado a ser utilizado para que melhor represente a previsão. Os modelos de suavização exponencial são simples e muito utilizados na previsão de demanda. Hyndman (2002) investigou onze modelos quantitativos e quatro modelos qualitativos de previsão. A investigação apontou que profissionais de *forecasting* apresentam uma maior satisfação nas técnicas de suavização exponencial, dentre as demais pesquisadas. Monks (1987) reforça que os modelos de previsão mais utilizados por meio de séries temporais são: Média Móvel, Projeção de tendência, Decomposição, Ajuste exponencial e Box e Jenkins.

Os modelos de previsão Box e Jenkins também conhecido por *Auto Regressive Integrated Moving Averages* (ARIMA) que na literatura em português chama-se modelo Autoregressivo Integrado de Médias Móveis, são modelos matemáticos que visam captar o comportamento da correlação seriada ou autocorrelação entre os valores da série e com base neste comportamento realizar previsões futuras.

Os modelos ARIMA resultam da combinação de basicamente três componentes denominados de FILTROS: - comportamento auto – regressivo (AR); - a integração (I); - e a componente de médias móveis (MA). Uma série pode ser modelada utilizando os três filtros ou apenas um subconjunto deles que resultam em vários modelos estacionários, não estacionários e sazonais (BOX e JENKINS, 1970; WERNER e RIBEIRO, 2003; FACHINELLO e BACCHI, 2006).

Faz-se necessário ressaltar que para utilizar a metodologia de Box e Jenkins (1970), a série a ser modelada deve apresentar-se estacionária ou que ela torne-se estacionária, após uma ou no máximo duas diferenciações. A seguir apresentam-se modelos estacionários, não estacionários e sazonais ARIMA, que são abordados com maiores detalhes por Box e Luceño (1997); Gooijer e Hyndman (2006) e Morettin (2008).

#### 2.2.1.1 Modelos Estacionários

Os modelos estacionários identificam se o processo está em equilíbrio. Um processo é considerado fracamente estacionário se média e variância se mantêm constante ao longo do tempo e a função de autocovariância depende apenas da defasagem entre os instantes de tempo. É considerado fortemente estacionário se todos os períodos conjuntos são invariantes a translação no tempo. Os modelos ARIMA podem ser descritos, conforme os parâmetros AR(p), MA(q) e I(d) (GARDNER, 2006).

Um modelo auto-repressivo AR(p) de uma série  $Z_t$  é descrita por seus valores passados regredidos e pela diferença  $\varepsilon_t$ , sua representação e dada pelas equações (03) e (04), respectivamente:

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + \varepsilon_t \quad (03)$$

$$\text{Onde, para } \tilde{Z}_t = Z_t - \mu \quad (04)$$

$\phi_i$  é o parâmetro que descreve como  $\tilde{Z}_t$  se relaciona com o valor  $\tilde{Z}_{t-i}$  para  $i = 1, 2, \dots, p$ . O modelo autoregressivo de ordem 1 ou AR (1) é a versão mais simples desta classe de modelos, é representado algebricamente pela equação (05).

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \varepsilon_t \quad (05)$$



Para um modelo ser estacionário é necessário que  $|\phi_1| < 1$  (condição de estacionariedade) e que as autocovariâncias ( $\gamma_k$ ) sejam independentes.

A identificação do modelo é obtida pela Função de Autocorrelação (FAC) e a ordem do modelo é tida pela Função de Autocorrelação Parcial (FACP), de acordo com a Figura 11.

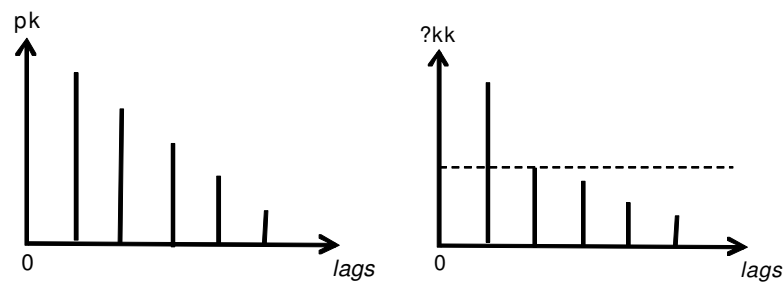


Figura 11 - Comportamento da FAC e FACP de um modelo AR (1).

Fonte: Ribeiro e Paula, 2000.

No caso do AR (1) as autocovariâncias são representadas por:  $\gamma_k = \phi_1^k \gamma_0$  e as autocorrelações  $\rho_k$  por:  $\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \phi_1^k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$  quando  $\phi_1$  é positivo a FAC decai exponencialmente, quando  $\phi_1$  for negativo a FAC tem o mesmo comportamento de decaimento apenas diferenciando na alteração de sinais.

Um modelo MA (q) (do inglês *moving average*) é assim chamado porque a série  $Z_t$  resulta da combinação dos ruídos brancos  $\varepsilon$  dos períodos atuais com os ocorridos no passado. A equação que representa um modelo autoregressivo MA(q) é dada pela equação (06):

$$\tilde{Z}_t = a_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (06)$$

Em que:  $\hat{Z}_t = Z_t - \mu$ ;  $\theta_i$  é o parâmetro que descreve como  $Z_t$  se relaciona com o valor  $\varepsilon_{t-i}$  para  $i=1, 2, \dots, q$ .

O modelo MA (1) é uma versão simples desta classe de modelos, pode ser representado pela equação (07):

$$Z_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (07)$$

Sua identificação é obtida pela FAC e sua ordem pela FACP, Figura 12.

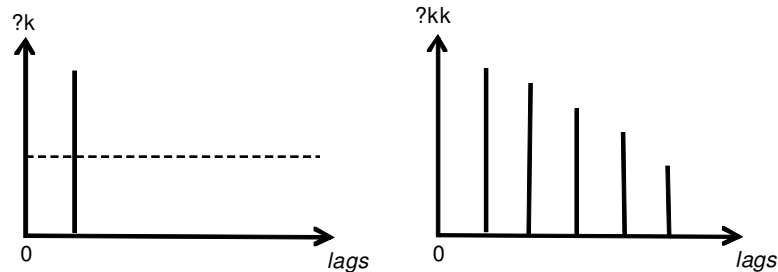


Figura 12 - Comportamento da FAC e FACP de um modelo MA (1).

Fonte: Ribeiro e Paula, 2000.

No modelo MA(q) as autocorrelações  $\rho_k$ , são autocovariâncias divididas pela variância, representada pela equação (08):

$$\rho_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} = \frac{-\theta_1 \sigma_\varepsilon^2}{(1 + \theta_1^2) \sigma_\varepsilon^2} = \frac{-\theta_1}{(1 + \theta_1^2)} \quad \text{e} \quad \rho_k = \theta_1^k > 1 \quad (08)$$

Neste caso a FAC apresenta apenas a primeira autocorrelação não nula e as demais iguais a zero. A primeira autocorrelação será positiva quando  $\theta_1 < 0$ , caso contrário será negativa (BOX, JENKINS e REINSEL, 1994).

Werner e Ribeiro (2003) observa que uma propriedade importante do MA (1), que provem da FAC, é que sua “memória” é somente um período, ou seja, para uma observação  $Z_{98}$ , a mesma esta correlacionada apenas com seu sucessor ( $Z_{99}$ ) e seu antecessor ( $Z_{97}$ ) e não a qualquer outro membro da série. No caso de obtenção de invertibilidade transformar MA (1) em AR (08) é necessário impor a restrição de que  $|\theta_1| < 1$ . Abraham e Ledolter (1983) afirmam que para transformar MA (1) em AR (08), é necessário que as raízes das equações:  $\theta(L) = (1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_q L^q) = 0$ , sejam maiores que um.

A integração do AR(p) com MA(q), forma o modelo autoregressivo de médias móveis ARMA (p, q). A vantagem de utilizar os dois componentes para formar o modelo ARMA é de que exigirá um número menor de termos, conforme representada pela equação (09).

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 Z_{t-1} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (09)$$

A função ARMA (1,1) é representada pela equação (10).

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (10)$$

No caso da FAC deste modelo é dada por (11):

$$\rho_1 = \frac{(1 - \phi_1 \theta_1)(\phi_1 - \theta_1)}{1 + \theta_1^2 + 2\phi_1 \theta_1}, \text{ onde } \rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} \text{ para } k > 1. \quad (11)$$

Observa-se que para o modelo ARMA (p,q) a FAC apresenta a função MA (q) para as defasagens  $k < q$ , devido sua memória durar apenas q período. Nas defasagens maiores  $k+1$  as características são iguais as de um modelo AR(p) (WERNER e RIBEIRO, 2003).

### 2.2.1.2 Modelos não estacionários

Em modelos não estacionários a série temporal apresenta média e variância dependente do tempo. Neste caso, os dados sofrem alterações como: (1) os dados não se apresentam em torno da linha horizontal ao longo do tempo; (2) a variação dos dados não é constante no tempo, ou seja, as flutuações aumentam e diminuem ao longo do tempo onde a variância está se alterando. A detecção de não-estacionariedade de uma série pode ser obtida pelo teste de raiz unitária Dickey – Fuller (ADF), Phillips – Perron (PP) ou Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS), qualquer um destes testes demonstra se a série é ou não estacionária. Informações sobre os testes de estacionariedade podem ser vistos em (ENDERS, 1995). Além do comportamento da série na FAC e FACP, se mostrar um decaimento lento, é indício de que a série não apresenta estacionariedade.

Para modelos autoregressivos integrados de médias móveis ARIMA, se a série não for estacionária, ela pode ser transformada, de acordo com Morretin e Tolói (1987). A transformação ocorre por meio de diferenças sucessivas na série original até que se obtenha uma série estacionária.

Os modelos ARIMA são responsáveis por capturar e modelar processos de memória curta (FAC decresce rapidamente a zero). Quando o processo não apresentar esta característica, utilizam-se outros modelos para estimar processos de memória longa (MORETTIN, 2006).

A primeira diferença de uma série pode ser descrita pela equação (12), e a segunda diferença conforme equação (13).

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad (12)$$

$$\Delta^2 Z_t = \Delta[\Delta Z_t] = \Delta[Z_t - Z_{t-1}] = Z_t - 2Z_{t-1} - Z_{t-2} \quad (13)$$

De acordo com Werner e Ribeiro (2003), o número de diferenças necessárias para tornar a série estacionária é denominado de ordem de integração. A integração  $d$  permite utilizar os modelos ARIMA  $(p, d, q)$ , descritos pela equação (14), e sua diferenciação é representada pela equação (15).

$$W_t = \phi_1 W_{t-1} + \dots + \phi_p W_{t-p} + \varepsilon_t - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (14)$$

$$\text{Onde, } w_t = \Delta^d Z_t \quad (15)$$

O modelo ARIMA (16) pode ser reescrito utilizando o operador de defasagem  $L$ , conforme pode ser observado na equação (17).

$$(1 - \phi_1 L - \dots - \phi_p L^p) W_t = (1 - \theta_q L^q) \varepsilon_t \quad (16)$$

$$\text{Em que: } W_t = (1 - L)^d Z_t \quad (17)$$

$$\phi(L)(1 - L)^d Z_t = \theta(L) \varepsilon_t \quad (18)$$

### 2.2.1.3 Modelos Sazonais

Os modelos SARIMA são uma extensão dos modelos ARIMA. Quando uma série apresenta um comportamento periódico num intervalo de tempo significativo, ou seja, autocorrelação sazonal, seja ela, mensal, trimestral, semestral, anual, entre outros, é

necessário acrescentar uma componente sazonal no modelo. Esse intervalo periódico é conhecido de sazonalidade e sua identificação é obtida pela FAC e FACP (BOX, JENKINS e REINSEL, 1994; SAFADI, 2004).

Nos modelos sazonais  $s$ , se uma série apresentar um comportamento sazonal num período inferior a um ano faz-se necessário adicionar a este modelo uma componente sazonal. Os modelos que fazem parte das séries onde apresentam autocorrelação sazonal são conhecidos por SARIMA (p, d, q) (P, D, Q). Estes modelos apresentam uma parte com parâmetros não sazonais (p, d, q) e outra com parâmetros sazonais (P, D, Q)<sub>s</sub>. O modelo sazonal multiplicativo foi descrito por Box e Jenkins (1976), conforme pode ser observado na equação (19).

$$\begin{aligned} & (1 - \phi_1 L - \dots - \phi_p L^p) (1 - \Phi_1 L^s - \dots - \Phi_P L^{Ps}) (1 - L)^d (1 - L^s)^D Z_t = \\ & = (1 - \theta_1 L - \dots - \theta_q L^q) (1 - \Theta_1 L^s - \dots - \Theta_Q L^{Qs}) \varepsilon_t \end{aligned} \quad (19)$$

Onde  $(1 - \phi_1 L - \dots - \phi_p L^p)$  representa a parte autoregressiva não sazonal de ordem p;  $(1 - \Phi_1 L^s - \dots - \Phi_P L^{Ps})$  refere-se à parte autoregressiva sazonal de ordem P, período sazonal s;  $(1 - L)^d$  é parte de integração não sazonal de ordem d;  $(1 - \theta_1 L - \dots - \theta_q L^q)$  é a parte não sazonal de médias móveis de ordem q;  $(1 - \Theta_1 L^s - \dots - \Theta_Q L^{Qs})$  é a parte sazonal de médias móveis de ordem Q e estação sazonal s (BOX e JENKINS, 1976; WERNER e RIBEIRO, 2003; GUJARATI, 2006).

De acordo com Vasconcellos e Alves (2000) a identificação de modelos sazonais é obtida pela FAC e FACP. Primeiramente se determina os valores das diferenças da parte não sazonal e sazonal (d e D). Se uma serie após a primeira diferença ( $\Delta Z_t$ ) apresentar um decaimento lento nas ordens múltiplas de s é necessário fazer uma diferença na parte sazonal ( $\Delta \Delta_s Z_t$ ). Após as diferenças faz-se a determinação de p, P, q e Q com base me ACF e ACFP. Se a série for puramente sazonal (p = q = 0), em que as funções de autocorrelação se apresentam de forma análoga a dos modelos não sazonais, os valores são nulos e ocorrem nas ordens que são múltiplos de s.

Já nos modelos que possuem filtros sazonais e não sazonais, as FAC e FACP apresentam maior complexidade, por ser uma mistura de modelos puramente sazonas com não sazonais, em que os coeficientes de autocorrelação de ordens baixas e fornecem subsídios para determinas p e q, e os modelos de ordens múltiplas de s ajudam a definir P e Q (VASCONCELLOS e ALVES, 2000).

### 2.2.2 Etapas da Metodologia Box e Jenkins

A construção da metodologia Box e Jenkins dos modelos ARIMA segue um ciclo composto por quatro etapas básicas (Figura 13) sendo: a) identificação; b) estimação; c) verificação/checagem e ou diagnóstico e d) previsão. Estes modelos são tratados e analisados por (BOX, JENKINS e REINSEL, 1994; MORETTIN e TOLOI, 2004; PEREIRA e REQUEIJO, 2008 e MORETTIN, 2008).

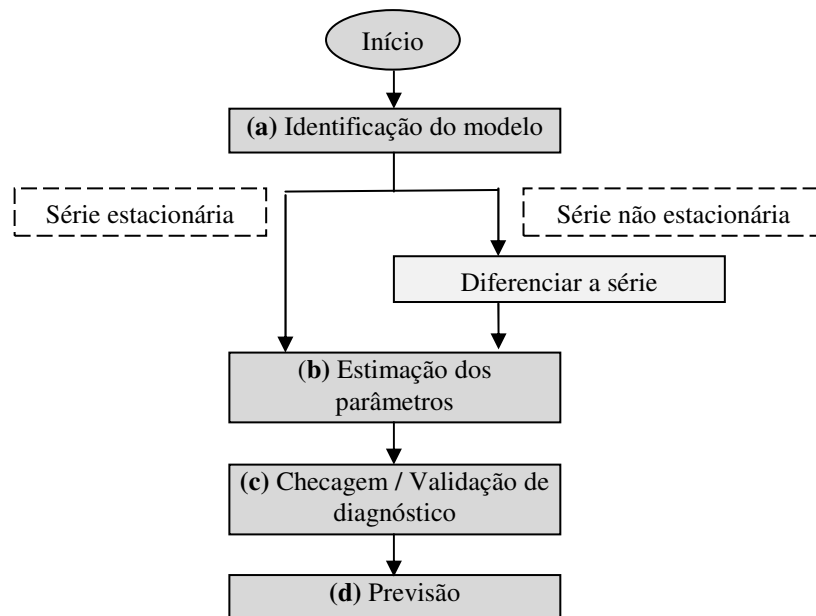


Figura 13 - Etapas da construção de um modelo ARIMA.

Fonte: Adaptado de Box e Jenkins, (1976).

As etapas básicas são assim detalhadas:

a) *Identificação*: é a etapa mais minuciosa da metodologia Box-Jenkins. Geralmente, identificam-se vários modelos concorrentes a representar o processo gerador da série em estudo. Isso porque, a FAC e FACP são complexas (inspeção visual) na identificação de decrescimento ou truncamento dos dados.

Portanto, pesquisadores recomendam utilizar outros processos de identificação como *Akaike Information Criterion* (AIC) e *Agency International de Energy* (SBC) e não apenas

FAC e FACP, para encontrar o modelo que melhor representa o processo. O AIC e SBC são critérios de seleção de modelos construídos com base na variância estimada, no tamanho amostral e nos valores de  $\phi$  ou  $\theta$  (MARCHEZAN e SOUZA, 2010). Cujas equações que os representam é dada por (20 e 21), Respectivamente:

$$\text{AIC} = T \cdot \ln(\text{soma do quadrado dos resíduos}) + 2 \cdot n \quad (20)$$

$$\text{SBC} = T \cdot \ln(\text{soma do quadrado dos resíduos}) + n \cdot \ln(T) \quad (21)$$

Onde  $n$  é o número de parâmetros estimados e  $T$  o número de observações utilizadas no ajuste do modelo. A regra de decisão deste teste consiste em escolher o modelo que apresentar o menor valor de AIC e SBC. Reforça-se que estes critérios devem ser usados em complemento a FAC e FACP.

b) *Estimação*: a estimação do modelo ARIMA consiste em estimar os parâmetros  $\phi$  e  $\Phi$  do comportamento autoregressivo e os parâmetros  $\theta$  e  $\Theta$  da componente de médias móveis. O processo de estimação de um modelo pode ser realizado pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), que é um método simples, ou através do método de máxima verossimilhança (MV).

c) *Verificação*: o processo de verificação da metodologia Box e Jenkins consiste em constatar se o modelo sugerido é condizente. Se for, segue para a previsão, caso contrário, uma nova especificação deve ser escolhida para modelar a série, ou seja, devem ser refeitas as etapas de identificação e estimação dos parâmetros.

A verificação é a etapa mais importante na identificação do modelo, e baseia-se na análise dos resíduos. Os resíduos são uma sequência de  $\varepsilon_t$  em que cada valor da série apresentar média zero, variância constante e não apresentar correlação serial. Em que:  $E(\varepsilon_t) = E(\varepsilon_{t-1}) = \dots = 0$ ;  $\text{Var}(\varepsilon_t) = \text{Var}(\varepsilon_{t-1}) = \dots = \sigma^2$ ;  $E(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-s}) = 0$  para todo  $s \neq 0$  (ENDERS, 1995). Portanto, se as variáveis aleatórias são independentes, não correlacionadas, os coeficientes de autocorrelação estatisticamente são iguais a zero. Ao determinar um modelo de regressão é oportuno tomar que o erro seja um ruído branco (CARDOSO, 2005).

Uma das formas mais simples e muito usada para identificar a existência de autocorrelação nos resíduos de modelos estimados (coeficientes de autocorrelação iguais a zero), é por meio da FAC e FACP, aplicadas nas séries dos resíduos. Se os coeficientes forem maiores que zero, ainda existem informações que não foram captadas pelo modelo, com isso,

ariska-se a gerar um modelo pobre e inadequado. Após verificar a autocorrelação dos resíduos, faz-se necessário verificar se eles seguiram a distribuição normal.

- d) *Previsão*: após as etapas de identificação, estimação e verificação, chega-se, a previsão a última etapa da metodologia, em que se prevê a série em instantes de tempo posteriores a  $n$ . Definidas as previsões os intervalos de confiança, prosseguem utilizando medidas de desempenho para avaliar as previsões obtidas.

Uma destas medidas são os critérios MAPE e U de Theil, utilizados nas avaliações conforme descritos por Gooijer e Hyndman (2006) que citam dezessete tipos de erros, destes os mais utilizados são o Erro Quadrático Médio (EQM), Média do erro absoluto (MEA) e Média Percentual do Erro Absoluto (MAPE) e U de Theil. Relembrando que, é considerado o melhor modelo de previsão de uma dada série o que apresentar o menor erro.

- *U de Theil*

O teste de U de Theil é expresso pela equação (22).

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n-1} \left( \frac{\bar{y}_{t+1} - y_{t+1}}{y_t} \right)^2}{\sum_{t=1}^{n-1} \left( \frac{y_{t+1} - y_t}{y_t} \right)^2}} \quad (22)$$

Onde:  $n$  número de observações;  $y_t$  valor observado no instante  $t$ ;  $y_{t+1}$  valor observado no instante  $t+1$ ;  $\bar{y}_t$  valor previsto no instante  $t$  (THEIL, 1966 *apud* FILDES, STEKLER, 2002).

Este critério é avaliado pelo valor obtido em  $U$ .  $U > 1$ , o erro do modelo é maior que o erro ingênuo;  $U < 1$ , o erro do modelo é menor que o erro ingênuo o que é considerado uma boa previsão. Portanto, quanto mais próximo de zero for este coeficiente melhor é a previsão.

#### 2.2.2.1 Testes de raiz unitária

Os testes mais simples e utilizados para avaliar a estacionariedade de uma série são os testes de autocorrelação e autocorrelação parcial, do qual, se obtém os correlogramas FAC e FACP em que se traça um intervalo de confiança onde os coeficientes podem variar com uma



tolerância de 5 % para mais dentro dos limites de confiança especificados. A equação (23) demonstra como o intervalo é definido.

$$IC (95 \%) = \pm 1,96 \sqrt{n} \quad (23)$$

Em que:  $IC (95\%)$  é o intervalo de confiança com 95% de significância estatística,  $n$  o tamanho da amostra.

A FAC e FACP segundo Gujarati (2000), que se apresentam fora do limite especificado, exceto para a defasagem um, são estatisticamente diferentes de zero, evidenciando uma série não estacionária.

Portanto, os testes de raiz unitária aplicados antes da modelagem têm por finalidade garantir as hipóteses sobre a estacionariedade dos modelos. Os testes propostos são: Dickey – Fuller, Phillips – Perron e/ou Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin.

*- Teste de Dickey – Fuller (DF)*

O teste de raiz unitária (ADF) surgiu a partir da década de 70 por Dickey e Fuller (1979), este teste incorpora defasagens em relação à variável que está sendo analisada, o qual, adiciona à própria variável defasada e diferenciada, na equação (24), assumindo a representação algébrica vista na equação (25).

$$\Delta y_t = \sigma + \beta_t + \gamma * y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (24)$$

Em que

$$\Delta y_t = \sigma + \beta_t + \gamma * y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \rho_{j+1} \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (25)$$

A hipótese  $H_0$  = Hipótese nula e  $H_a$  = Hipótese alternativa são descritas por:

**$H_0$ : A série possui raiz unitária, ou, a série é dita não estacionária;**

**$H_a$ : A série não possui raiz unitária, ou, a série é dita estacionária.**

A regra de decisão é obtida a partir da análise de que, se a estatística calculada é menor que os valores críticos, rejeita-se  $H_0$ , ou seja, a série não possui raiz unitária (é estacionária).

Convém reforçar que, se a série for não estacionária (modelos explosivos), se faz necessário aplicar à primeira ou segunda diferença na série e torná-la estacionária (BEM, 1998). Tais testes para identificar a estacionariedade devem ser aplicados nos dados originais, para obter assim, uma determinação mais precisa da ordem de integração da série no caso de modelos ARIMA.

#### 2.2.2.2 Testes de normalidade

A normalidade busca ser atendida com o objetivo de obter confiabilidade aos testes estatísticos, pois os mesmos baseiam-se na distribuição normal do termo residual. Quando violada, afeta a qualidade de não-tendenciosidade e variância mínima do método dos mínimos quadrados ordinais.

Dentre os vários modelos estatísticos que testam a normalidade os que mais se destacam são: Jarque-Bera e o gráfico Q-Q plot.

##### - Jarque – Bera (JB)

O teste JB é simples na sua execução e compreensão, depende de dois parâmetros (assimetria e curtose) e é considerado muito preciso quando testada a presença de normalidade. O teste é considerado falho e há grande probabilidade de cometer erro tipo II, quando aceita-se a hipótese de normalidade nas situações em que a hipótese alternativa de não normalidade é verdadeira. Este teste é representado pela equação (26), a qual segue uma distribuição Qui-Quadrado com dois graus de liberdade.

$$JB = N \left[ \frac{A_3^2}{6} + \frac{(K_4 - 3)^2}{24} \right] \sim \chi_2^2 (\alpha = 5\%) \geq 5,99 \quad (26)$$

Em que:  $A_3$  coeficiente de assimetria;  $K_4$  coeficiente de curtose excessivo e  $N$  tamanho da amostra (JARQUE e BERA, 1980) .

As representações das hipóteses testadas são:

**$H_0$ : Apresenta assimetria = zero e curtose = três (série normal);**

**$H_a$ : Apresenta assimetria  $\neq$  zero e curtose  $\neq$  três (série não normal).**

A regra de decisão baseia-se nos coeficientes de assimetria e curtose. Se p-valor for maior que o nível de 0,05% cujo valor crítico é 5,99, aceita-se assim, a hipótese nula.

#### - *Q-Q plot*

Este teste é um dos métodos gráficos mais utilizados na verificação de normalidade de *forecasting*. É considerado simples e poderoso na comparação de duas distribuições, consiste numa comparação gráfica dos quartis teóricos da distribuição normal com os quartis dos dados amostrais. O gráfico Q-Q Plot consiste em comparar duas distribuições, se elas forem aproximadamente iguais “uma distribuição sobrepõe a outra” considera-se que a serie segue uma distribuição normal, caso contrário as duas distribuições diferem ao longo de alguma dimensão “não normal”. Neste teste os quartis de probabilidade esperados é de que seja  $Z_i$  tal que (Equação (27)):

$$P(Z < z_i) = \frac{i - 0,5}{n} \quad (27)$$

Estes são valores que se fazem presentes no eixo das ordenadas. Sua interpretação é feita pela análise visual no gráfico Q-Q Plot, em que, se os erros possuírem distribuição normal, todos os pontos do gráfico devem posicionar-se formando uma reta (WILK e GNANADESIKAN, 1968; CIRILLO e FERREIRA, 2003).

#### 2.2.2.3 Testes de autocorrelação

O teste de autocorrelação indica se os resíduos são autocorrelacionados entre si. Se há presença de autocorrelação diz-se que as estimativas através do método (MQO) não apresentam variância mínima. Este teste provoca um viés nos erros-padrão, conduzindo a intervalos de confiança incorretos.

#### - *Ljung-Box*

Box e Pierce (1970) desenvolveram um teste de hipótese para as autocorrelações dos resíduos estimados, ele não detecta quebras específicas no comportamento dos ruídos brancos,

se estes valores são muito altos. Com isso, Ljung e Box (1978), fizeram uma modificação neste teste da qual é expressa pela equação (28):

$$Q(K) = n(n+2) \sum_{k=1}^h \frac{\hat{r}_k^2}{(n-k)} \quad (28)$$

Em que  $n$  número de observações;  $\hat{r}_k^2$  autocorrelação no *lag*  $k$  e  $h$  representam o número de *lags* que estão sendo testados, seguindo a distribuição Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com  $p$  graus de liberdade, sendo esta uma estatística mensurada por *softwares* econométricos. As hipóteses a serem testadas são assim descritas:

**H<sub>0</sub>: Os resíduos representam ruído branco (RB);**

**H<sub>a</sub>: Os resíduos não representam ruído branco (RB).**

Neste caso, a regra de decisão analisa se a estatística calculada excede o valor crítico da Tabela de  $\chi^2$  para determinado nível de significância, rejeitando-se assim a hipótese nula de que todos os ( $\hat{r}_k$ ) são iguais a zero, ou seja, os dados apresentam estrutura de correlação serial significativa nos ruídos, caso contrário, são diferentes de zero (o resíduo não é ruído branco) (GUJARATI, 2000; SÁFADI, 2004).

### 2.2.3 Aplicações modelos de séries temporais no setor de energia elétrica

As aplicações de séries temporais têm sido muito utilizadas na previsão de demanda e consumo energético por empresas do setor. Souza (2005) propôs a aplicação de modelos de séries temporais na previsão do consumo industrial de energia elétrica em Santa Catarina, em que, aplicou-se a combinação de modelos univariados e regressão dinâmica, com o foco de identificar e gerar previsões mais precisas que as até então realizadas na empresa. Onde se concluiu que as previsões mais precisas foram atingidas trabalhando com variáveis dependentes e independentes na mesma magnitude.

Dias (2008) utilizou a metodologia Box - Jenkins para estimar modelo de previsão mensal do consumo elétrico no Brasil na qual, encontrou modelos SARIMA (0, 1,0) x (1,0,0)<sub>12</sub>, além da utilização da regressão dinâmica. O autor obteve como conclusão que o

consumo energético do país está ligado ao nível de atividade econômica do mesmo, além de obter o impacto do racionamento de energia ocorrido no país e seu comportamento de consumo como um todo.

Storck (2008) utilizou modelos de Box e Jenkins ARIMA com modelos VEC (Vetor Autoregressivo com Correção dos Erros Vetoriais) com o objetivo de projetar mensalmente a demanda de energia elétrica, com agilidade e precisão entre a renda e preço da elasticidade de demanda elétrica. Concluiu, portanto, que o método utilizado é eficiente, pois encontrou resultados próximos de uma análise mais aprofundada. Além de poder ser utilizado como balizador para as previsões de demanda no horizonte de estudos, demonstrou-se ágil por exigir menor tempo de execução.

Conforme pode ser observado, as modelagens de séries temporais analisam o comportamento passado e prevêem que o futuro terá o mesmo comportamento. Já a metodologia de cenários trabalha com a hipótese de que o futuro não será uma extrapolação do passado. Portanto, para obter uma análise mais completa da região atendida pela cooperativa será complementada com análise qualitativa de cenários, conforme seção 2.3.

### **2.3 Análise de Cenários**

A elaboração de cenários surgiu durante a Segunda Guerra Mundial e era usado no planejamento militar. Em 1970, foi adaptado para a indústria pelos planejadores da Royal Dutch/Shell em que, a empresa previa as alterações do preço do petróleo e até mesmo a queda na demanda (GARVIN e LEVESQUE, 2006).

Desde então, empresas de outros setores têm trabalhado com cenários a fim de desenvolver planejamento estratégico, melhorias da tomada de decisão de investimentos e mercados competitivos (extensões de linha de produtos, entrada de novo mercado, *joint ventures*). A estas três razões deve se acrescentar a dinamicidade dos eventos que influenciam na economia regional e também a interdependência existente entre a economia de qualquer região com a economia mundial. Em Los Angeles no departamento de saneamento, energia e no sistema de saúde tem sido utilizado para se obter uma melhor visão das incertezas do futuro. Para Garvin e Leveque (2006), o planejamento de cenário investiga várias incertezas simultaneamente.

A elaboração de cenários tem crescido na área de planejamento estratégico, tanto em pequenas, médias e grandes empresas e até mesmo órgãos do governo, com o objetivo de ter uma referência de futuros alternativos em que decisões serão tomadas. Em áreas que se apresentam incertezas, cresce a necessidade de analisar perspectivas futuras. Esta é uma tecnologia que incorpora vários instrumentos, técnicas de organizações e sistemas de dados utilizados na construção de tendências coesas e condizentes (DIAS, 2010).

Dentre as varias metodologias de cenários que são utilizadas pelas empresas estão: Godet, Schwartz, Poter, Grumbach e Marketing, Comunicação e Planejamento (MACROPLAN). Já para a análise de cenários que compara a situação do município estudado com o desempenho da região e posterior com o estado, onde o mesmo está inserido pode-se usar a Metodologia de Kohler. Esta ferramenta é utilizada pelo Conselho Regional de Desenvolvimento (COREDE) Fronteira Noroeste do RS.

*- Metodologia de cenário de Kohler*

Kohler (2006) tem trabalhado com uma metodologia própria por meio de elaboração e comparativo por quadrantes, conforme pode ser observado na Figura 14, em que permite visualizar o comportamento dos municípios frente à região e o estado.

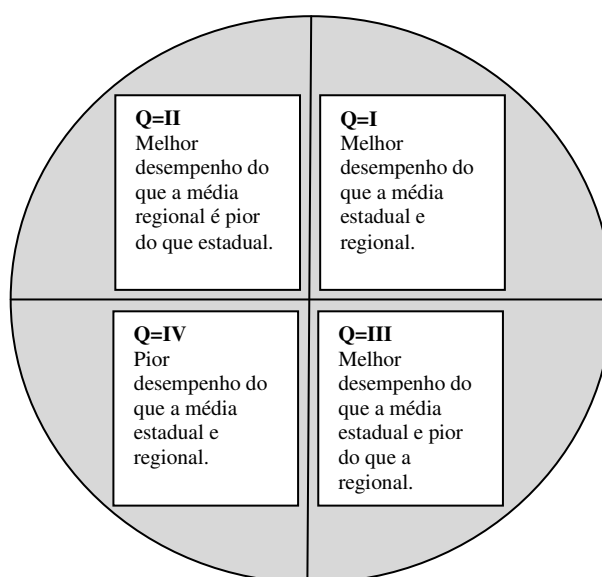


Figura 14 – Metodologia de Kohler.

Fonte: Adaptado de Kohler, 2006.

Cada quadrante tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre município - região - estado. O quadrante I representa um melhor desempenho dos municípios em relação às médias estadual e regional; o quadrante II se os municípios encontram-se melhor do que a região e pior do que o Estado; o III se os seis municípios estão melhores que o Estado e pior que a região e o IV e último se os municípios apresentam um desempenho pior do que as medias regional e estadual. Salienta-se que, um melhor desempenho somente servirá como comparativo de quantidade, sem conotação qualitativa de que o urbano seja melhor que o rural.

O setor energético tem utilizado desta metodologia para se programar e estudar novas formas de consumo e geração energética para atender a demanda de mercado. O estudo de cenários auxilia na visualização de um ambiente futuro onde a região em estudo encontra-se inserida.

A análise qualitativa de cenários na cooperativa em estudo é importante, pois além de informar a mesma das possíveis mudanças no comportamento de consumo energético, auxilia a mesma a se preparar e se adaptar rapidamente as mudanças que ocorrem e pode ocorrer na região e de forma concisa saber a melhor forma de investir seus recursos.

### 2.3.1 Região Fronteira Noroeste atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural

A região fronteira noroeste originou-se da imigração de descendentes europeus, onde a região se desenvolveu em torno de uma agricultura diversificada, em meados da década de 40, mas, limitada com o mercado. Mais tarde passou a ter uma forte participação na economia com a produção de suínos surgindo o primeiro frigorífico na região agregando valor ao produto (DALLABRIDA, BÜTTENBENDER, 2006; DALLABRIDA, BÜTTENBENDER 2007 e BÜTTENBENDER et.al., 2010).

No início da década de 60, devido à baixa rotatividade e má preservação do solo, houve a crise na agricultura. Para recuperar a competitividade, buscou-se a modernização dos produtos. Com a recuperação do solo foram fundadas as primeiras fábricas de máquinas trilhadeiras e mais tarde colheitadeiras agrícolas (BÜTTENBENDER, 1995).

Na década de 70, a região se fortaleceu na produção de grãos em especial o trigo e soja, desta forma a região começou a crescer apresentando maior capacidade competitiva de

mercado no ciclo de processos de industrialização entre agricultura, pecuária e setor metal mecânico.

Hoje a região continua se destacando pela agricultura, agroindústrias familiares, setor metal mecânico e principalmente setor leiteiro, que mesmo competindo com a produção de grãos, juntos apresentam um ressalve na economia regional (FAGONDE, 2011).

O setor metal mecânico, tem se desenvolvido a partir da necessidade de plantio e colheita de grão na região. Surgiu em meados de 1945 pelos engenheiros Balduino Schneider e Frederico Jorge Logemann que juntos consolidaram a Schneider Logemann & Cia (SLC), empresa de equipamentos agrícolas no município de Horizontina (MACHADO, 1995). Mais tarde em 1953, com a participação de seis sócios consolidaram a marca IDEAL no município vizinho em Santa Rosa (BRUM, 2010).

Hoje ambas foram compradas por multinacionais e estão se transformando em montadoras e necessitam de parceiros que forneçam peças para suas linhas de montagem. De acordo com Lorenset (2011) há 21 metalúrgicas parceiras, sendo 7 da John Deere (antiga SLC) planta Horizontina e 14 da AGCO (antiga IDEAL) planta Santa Rosa.

Tais parceiras não se encontram apenas em meios urbanos, mas sim em localidades rurais próximas as montadoras, contribuindo para o desenvolvimento regional no meio rural.

#### 2.3.1.1 Dados socioeconômicos

Para Méndez (2002) a globalização é um processo vinculado ao território, que depende da dinâmica da economia de território – região – cidades - lugares, ou seja, é afetado pelo comportamento dos agentes locais. Assim, como Dallabrida e Becker (2003) também acreditam que o desenvolvimento econômico está ligado ao desenvolvimento territorial.

Os dados socioeconômicos aqui representados referem-se aos 20 municípios pertencentes a região fronteira noroeste. Segundo a Fundação de Economia e Estatística - FEE (2011), a região noroeste apresenta hoje uma população total de 203.494 habitantes, área total de 4.689 Km<sup>2</sup> e a densidade demográfica de 43,3 hab./Km<sup>2</sup> e taxa de analfabetismo de 6,15%. A expectativa de vida ao nascer é de 73,87 anos. Quanto ao coeficiente de mortalidade infantil a região apresenta 13,95 óbitos por mil nascidos vivos. Referente à economia a região possui



um Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 3.580.760 milhões, e o PIB *per capita* de R\$ 17.432 mil, e com uma exportação total de U\$ 349.249.073 milhões.

### 2.3.2 Aplicação de cenários no setor energético.

No setor energético a aplicação de cenários tem sido utilizada na obtenção de perspectivas em tecnologia energéticas, ou seja, cenários estratégicos de investimento mundial neste setor, dentre os quais, mencionam-se:

Pires, Gostkorzewicz e Giambiacci (2001), têm trabalhado nas restrições da oferta de energia elétrica que podem futuramente interferir no crescimento econômico do país e quais soluções, na retomada de investimento, serão necessárias para a expansão deste setor, obtendo aprendizados com problemas vividos pela Califórnia nos USA. Os autores finalizam o estudo afirmando que a “uma situação favorável de energia elétrica deve vir acompanhada da resolução dos gargalos que impedem a conclusão das reformas do setor” (PIRES, GOSTKORZEWICZ e GIAMBIACI, 2001 p. 38). E que cada vez mais este setor passa por evoluções interdependentes, mostrando o quanto é imprescindível uma ação regulatória articulada no setor.

Guedes Filho e Camargo (2003) elaboraram um estudo sobre crises, causas e cenários de crescimento do setor para a Câmara Brasileira de Investidores em Energia Elétrica (CBIEE) com o objetivo de obter um panorama geral da situação do setor energético brasileiro, referente ao que se espera do setor para atender o desenvolvimento dos demais setores. Portanto, os pesquisadores focaram em uma abordagem na crise vivenciada pelo setor, numa análise estrutural tarifária da energia elétrica no país, no desequilíbrio econômico – financeiro, nas possíveis demandas a serem atendidas, nas necessidades de investimento e na identificação das fontes de recursos deste setor. Em que chegaram à seguinte análise precisa investir em geração e na legislação do setor para que haja continuação do pleno desenvolvimento nacional e que seus consumidores se sintam mais seguros em relação aos serviços que lhe são oferecidos.

Para Irffi et. al., (2009), têm aplicado cenários de previsão em que foi abordado, o crescimento econômico, a racionalização, a substituição de energia elétrica por outra fonte de energia e o comportamento das tarifas de energia elétrica. “A partir desta análise os autores construíram três cenários macroeconômicos (alto, médio e baixo) para a economia brasileira,

que serviram de base para a previsão do mercado de energia elétrica no Plano Decenal de Expansão 2003-2012 da Eletrobrás” (IRFFI, 2009, p. 78).

Cenários aplicados no setor energético auxiliam na tomada de decisão de investimento na geração. Faz-se necessário reforçar também que para a cooperativa é importante dispor de um modelo que lhe auxilie na adaptação e rápida tomada de decisão para obter um melhor nível de competitividade no setor. Na seção que se segue será apresentado como modelos de Pesquisa Operacional (PO) podem contribuir no planejamento do setor energético.

## **2.4 Pesquisa Operacional**

A Pesquisa Operacional surgiu na Segunda Guerra Mundial, por cientistas britânicos em 1938, com estudos na tecnologia de radares para interceptar aviões inimigos. Após o término da guerra a pesquisa operacional evoluiu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos especificadamente no Pentágono. Assim foram adaptadas e migradas para as mais diversas áreas (ARENALES et. al., 2007; TAHA, 2007).

A pesquisa parte do princípio de uma abordagem que se parece com a forma com que a pesquisa é conduzida nos campos científicos estabelecidos, para investigar o problema em questão o processo inicia por uma cuidadosa observação e formulação do problema, incluindo coleta de todos os dados relevantes. Após se faz a construção de um modelo científico (modelo matemático), modelo este que representa de forma precisa os recursos para a solução encontrada para validar o problema real (HILLIER e LIEBERMAN, 2001).

A validação dos experimentos é conduzir para testar hipóteses e modificá-las se necessário. Contudo, PO envolve pesquisa científica e criativa junto à propriedade fundamentais de operação, além de focar na prática do gerenciamento das organizações. Para ter sucesso, PO precisa também prover conclusões positivas e compreensíveis para tomar uma decisão quando elas são necessárias (HILLIER e LIEBERMAN 2001).

A utilização de PO na análise de estudos de modelos de otimização é muito utilizada em situações de tomada de decisão (ANDRADE, 2002; KAGAN et.al., 2009).

### 2.4.1 Modelos de Pesquisa Operacional e modelos de otimização

A programação linear trata de problemas de decisão em que utiliza modelos matemáticos que procuram representar (imitar) o problema real. O modelo matemático determina valores para as incógnitas obtendo-se soluções que dependem de dados do problema, onde se segue a validação do modelo, que consiste em verificar se os resultados obtidos pela resolução do problema são ajustados com a realidade (ARENALES et. al., 2007).

Portanto, a solução do modelo auxilia na tomada de decisão, mas não é a única a interferir nesta ação, outros fatores não quantificáveis devem ser levados em consideração na decisão final. “Convém salientar que modelos não substituem tomadores de decisão” (ARENALES et. al., 2007, p.4).

Conforme pode ser observado na Figura 15, a abordagem de soluções de problemas em PO é composta por cinco fases. São elas: (a) definição do problema; (b) construção do modelo; (c) solução do modelo; (d) validação do modelo; e (e) implementação do modelo (ARENALES et. al., 2007; TAHA, 2007).

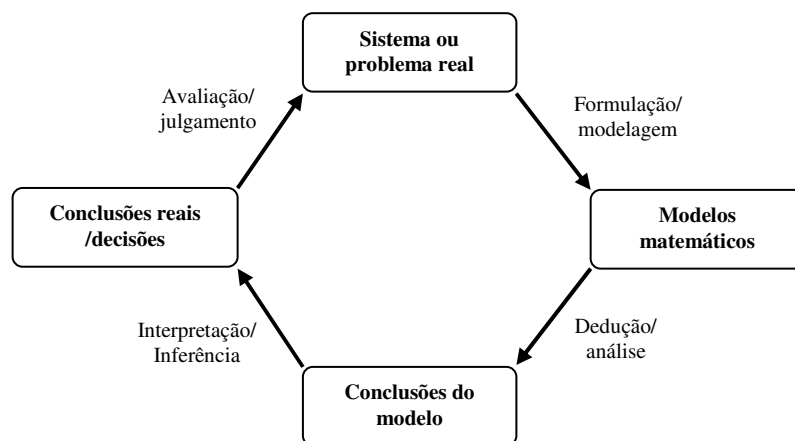


Figura 15- Processo de modelagem da solução de problemas em PO.

Fonte: Adaptado de Arenales et. al.,2007.

*Fase (a):* procura define o escopo do problema em estudo, é executada por toda equipe, em que consiste em identificar os elementos principais de decisão, ou seja, descrever as alternativas de decisão, determinar o objetivo da investigação e determinar as limitações do sistema.

*Fase (b):* aqui a fase (a) é traduzida de acordo com a ligação e simulação da matemática e lógica, e até mesmo a combinação de ambas. Busca-se ajustar o modelo a um dos métodos matemáticos, exemplo: programação linear para se chegar a um resultado utilizando algoritmos disponíveis. Se a equipe chegar a modelos muito complexos os mesmos são simplificados e pode-se utilizar uma abordagem Heurística<sup>3</sup>.

*Fase (c):* nesta fase trabalha-se com métodos de solução de algoritmos, que auxilia na resolução da fase (b), sendo que, estes algoritmos de otimização são bem definidos. Leva-se em consideração nesta fase a análise de sensibilidade, necessária quando não se obtém parâmetros estimados com precisão, neste caso, é importante comparar comportamento da solução ótima com os parâmetros estimados.

*Fase (d):* faz-se a verificação do modelo, se ele representa adequadamente o comportamento do sistema, ou seja, se ele faz ou não o que diz fazer. Pois, “a qualidade da solução de um modelo depende da precisão com que este modelo representa o modelo”, (ARENALES et. al., 2007, p.5.)

*Fase (e):* nesta fase se tem a preocupação de aplicar o resultado obtido na prática, ou seja, onde se aplica os resultados dos modelos em decisões, geralmente executada pela equipe de PO.

Em PO, geralmente mais de uma técnica é utilizada para resolver modelos matemáticos que podem surgir na prática, onde o tipo de complexidade determina a natureza do modelo de solução.

A técnica mais utilizada em PO é a programação linear (aplicada a modelos que apresentam função objetivo e restrições lineares). Entre as demais técnicas apresentam-se: programação inteira (onde as variáveis assumem valor inteiro), programação dinâmica (em que o modelo original pode ser composto em subproblemas menos complexas de tratar), otimização em redes (na qual o problema pode ser modelado como uma rede) e programação não lineares, onde as funções do modelo são não lineares, (TAHA, 2007; KAGAN et., al., 2009).

---

<sup>3</sup>Abordagem heurística: heurística do grego *heuriskein* significa “encontrar” ou “descobrir”. O conceito abordado por Pörtl (2001) é de que são técnicas para melhorar o desempenho de métodos de solução. Já para Erdmann e Landmann (2011), é um método de solução de problemas que permite achar soluções boas com custos aceitáveis.

Faz parte do dia-a-dia das mais variadas empresas, tanto nas que possuem equipe especializada e nas que simplesmente fazem uso de *software* especializado. Dentre as áreas que utilizam PL, encontram-se as de alimentação, rotas de transporte, manufatura, siderurgia, petróleo, agricultura, carteira de investimento, mineração, localização industrial, área da engenharia, elétrica entre outros (PRADO, 2004; CAIXETA FILHO, 2004 e KAGAN, et.al. 2009).

Para Prado (2004), a programação linear é uma técnica de otimização, além de ser uma ferramenta para obter máximo lucro e mínimo custo nas situações em que se tem várias opções de escolha sujeitas a algumas restrições.

Nos modelos de utilização linear as variáveis são contínuas e de comportamento linear, tanto restrições como a Função objetivo. É flexível quanto a sua eficiência dos algoritmos de passar de programação não-linear para linear (GOLDBARG e LUNA, 2005).

As vantagens e benefícios obtidos em utilizar programação linear nas empresas, relatada por Prado (2004), é que a redução de custo obtida por estas organizações apresenta-se na faixa de 1 - 5% e em alguns casos chegam a 15%. Além de permitir melhoras nos estudos de Qualidade Total, auxilia na identificação de gargalos em linhas de produção e construção civil, fornece opções de expansão e avalia o potencial de aplicabilidade de uma pesquisa.

O pioneiro Lasdon (1970), aborda a teoria de otimização a sistemas de grande porte que a sua época apresentava além de complexidade de suas funções de restrição e da função objetivo também problemas de capacidade de computação. Estes últimos estão solucionados nos dias atuais. Para enfrentar as complexidades afirma que “felizmente, programas muito grandes, geralmente apresentam uma estrutura especial”. (LASDON, 1970, p.104). Para resolvê-los, recomendava a utilização da decomposição dos sistemas complexos em subsistemas de modo a haver subproblemas menores. Como subsistemas interagem a solução dos subproblemas e em geral não levam a solução correta, apresentava por esta razão uma abordagem em diversos níveis formando uma pirâmide de tomada de decisões. Cada subproblema menor é resolvido pelo algoritmo desejado e depois são computadas as interações e a viabilidade dessas soluções num nível mais alto. Assim num processo iterativo pode se chegar a uma solução viável no problema maior tendo encontrado soluções ótimas para os problemas menores depois de adequar suas restrições ao problema maior.

Um modelo, de acordo com a especificação de Prado (2004), é a representação de um sistema. Eles podem ser icônicos quando se varia em escala (maquete de uma usina); analógico quando são representadas por outras equivalentes (desvalorização da moeda, aumento ou diminuição das taxas de juros); simbólicos ou abstratos quando apresenta

semelhança conceitual com o sistema; de análise matemática por meio de um conjunto de equações (Modelo de PL) ou diagramática, onde a característica do estudo é representada através de um diagrama.

#### 2.4.2 Formulação de modelos de Programação Linear

De acordo com Hillier e Lieberman (2001) e Taha (2007), os modelos de PL apresentam três componentes básicas; as variáveis (decisão que se procura determinar); o objetivo ou meta que se precisa “Maximizar ou Minimizar” e as restrições em que a solução deve satisfazer.

Para este mesmo autor a solução de um modelo pode apresentar-se **viável** e **ótima**. Será viável quando satisfizer todas as restrições. É considerada ótima se além de ser viável, apresentar melhor valor (máximo e mínimo) da função objetivo.

A formulação algébrica de forma geral, entre as  $n$  variáveis obtidas, torna-se variáveis de decisão e podem ser representadas por  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , cujos valores devem ser encontrados satisfazendo as restrições.

Dantzig e Thapa, (1997), e Goldbarg e Luna (2005), apresentam um modelo geral de forma padrão com uma notação de matriz de vetores conforme representado pela equação (29):

$$\text{Otimizar } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (29)$$

sujeito a :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = p + 1, p + 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

$$x_j \in \mathfrak{R}, \quad j = q + 1, q + 2, \dots, n$$

As notações são adotadas na forma que segue:

$M = \{1, 2, \dots, m\}$ , representa o conjunto dos índices das restrições do problema;

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ , conjunto de índices das variáveis.

$M_1 = \subset M$  e  $N_1 \subset N$  ;

$A = \{a_{ij}\} \equiv$  matriz de restrições;

$a_j \equiv j$  –ésima da coluna de  $A$ ;

$x = (x_j), j \in N$  / vetor coluna de  $n$  componentes;

$c = (c_j), j \in N$  / vetor linha de  $n$  componentes;

$d = (d_i), i \in M$  / vetor coluna de  $m$  componentes;

Faz-se necessário esclarecer que o termo otimizar, refere-se as possibilidades de maximizar ou minimizar a função objetivo. A dificuldade, porém, consiste nos dados da matriz “A” e os vetores “b” e “c”, de encontrar o vetor das variáveis contínuas “x” que satisfaçam as restrições e otimizem o valor do critério “z”.

Dantzig e Thapa, (1997); Goldberg e Luna (2005) e Kagan et.al. (2009), abordam que além da forma mista, há outras duas formas distintas que são transformadas de acordo com a Figura 16.



Figura 16 - Transformação de formulações

Fonte: Adaptado de Goldberg e Luna, 2005.

A forma padrão é representada pela equação (30).

Otimizar  $z = c x$

sujeito a :  $Ax = b$

$x \geq 0$

sendo  $b \geq 0$  dado.

(30)

E a forma canônica é expressa pela equação (38).

Otimizar  $z = c x$

sujeito a :  $Ax \leq b$  ou  $Ax \geq b$

$x \geq 0$

(31)

Tais expressões do conjunto de equações apresentadas podem ser reescritas de acordo com três operações:

*Operação 1:* transformação do critério de otimização de maximização para minimização e minimização para maximização.

*Maximizar*( $f(x)$ ) *corresponde a* *Minimizar*( $-f(x)$ ) e  
*Minimizar*( $f(x)$ ) *corresponde a* *Maximizar*( $-f(x)$ ).

*Operação 2:* mudança de uma variável livre ( $x_j \in \Re$ ) em variável negativa, ou seja, substituir a variável de transformação por duas auxiliares, maiores ou igual a zero em que a soma seja igual a variável original.

$$x_j = x_n^1 - x_n^2 \quad e \quad x_n^1 \geq 0, x_n^2 \geq 0 \quad (32)$$

*Operação 3:* alteração de desigualdades em igualdades e igualdades em desigualdades. A equação (34) apresenta a restrição de menor em restrição de igualdade, a equação (35) de maior ou igual também em igualdade.

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n \leq b \quad (33)$$

Em que para sua transformação acrescenta-se uma variável de folga  $x_{n+1}$ , onde  $x_{n+1} \geq 0$ , ficando expressa então:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n + x_{n+1} \leq b \quad (34)$$

Na sequência da restrição:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n \geq b \quad (35)$$

Introduz-se uma variável de folga  $x_{n+1}$  com coeficiente negativo conforme equação (36).

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n - x_{n+1} = b \quad (36)$$

Em que  $x_{n+1} \geq 0$ .

### 2.4.3 Aplicações de PL na otimização de sistemas elétricos



Diversas aplicações de Pesquisa Operacional tem sido utilizadas no desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização em energia elétrica. Vecchi (2004), propôs a aplicação de modelos matemáticos para otimizar os custos com instalação de elementos que compõem uma rede de distribuição de energia elétrica, tais como cabos e alimentadores, minimizar perdas de energia na distribuição. A conclusão do trabalho permitiu a empresa comparar a rede de distribuição de energia já existente com a rede otimizada, além de apresentar o dimensionamento da manutenção da rede elétrica.

Fei (2006) utilizou a técnica de PL, com o intuito de modelar as redes com proporções reais da qual foi possível a obtenção resultada em tempos de execução compatível para planejar os sistemas de distribuição de energia. Além de alocar automaticamente novos reforços nos redutos de trechos de redes e a expansão de subestações existentes. Onde se concluiu rapidez e eficiência na codificação das redes de distribuição.

Galvão (2008) sugeriu a aplicação de PO para que as empresas do setor energético trabalhem na redução de custos por meio da utilização eficiente de seus recursos físicos, humanos e financeiros para atender a demanda de seus consumidores.

Os modelos de otimização de PO aplicados no setor energético muito tem contribuído para alocações de usinas Hidrelétricas e na melhor distribuição de redes (TAGLIALENHA, 2008). Nesta dissertação a PO, vai contribuir como uma ferramenta de simulação na melhor alocação de placas fotovoltaicas numa cooperativa de eletrificação rural.

No capítulo 3, será abordado o passo a passo da contribuição de previsão de séries temporais no consumo energético em cinco anos à frente com o complemento da análise qualitativa de cenários no melhor entendimento da região atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural. Além da elaboração de uma ferramenta hierarquizada e modelos de otimização como forma de simulação de pontos potenciais de geração fotovoltaica.

### 3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Por intermédio desta dissertação busca-se apresentar a previsão de consumo para os anos de 2011 a 2015 para as seis subestações da cooperativa, utilizando séries temporais e análise qualitativa de cenários como uma forma de identificar possíveis perspectivas futura no aumento do consumo, assim como, elaborar e propor uma ferramenta a cooperativa como forma de auxílio no levantamento de possíveis pontos de investimentos em painéis fotovoltaicos conectado em suas redes.

Os procedimentos utilizados objetivam o mapeamento do consumo de energia de cada subestação da rede da Cooperativa de Eletrificação Rural entre Rios Ltda (CERTHIL), situada na região noroeste do RS. Para isso, no decorrer deste estudo utilizou-se a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental, o método estatístico e o método histórico, sendo: - Pesquisa bibliográfica: em livros, teses, artigos científicos e materiais disponíveis em meio eletrônico; - Pesquisa documental: análise de documentos internos da empresa tais, como mapas de alocação de redes e consumo de energia atual; - Método estatístico: utilização de técnicas de modelagem e organização de dados quantitativos; - Método histórico: levantamento das demandas históricas de consumo de energia elétrica.

Como técnicas utilizaram-se softwares específicos como *statística 7.0* e *Eviews 6.0 versão estudante* para modelagem de previsão de demanda em séries temporais, além do software aplicativo Excel®. A dissertação é proposta em quatro fases de elaboração, conforme Figura 17.

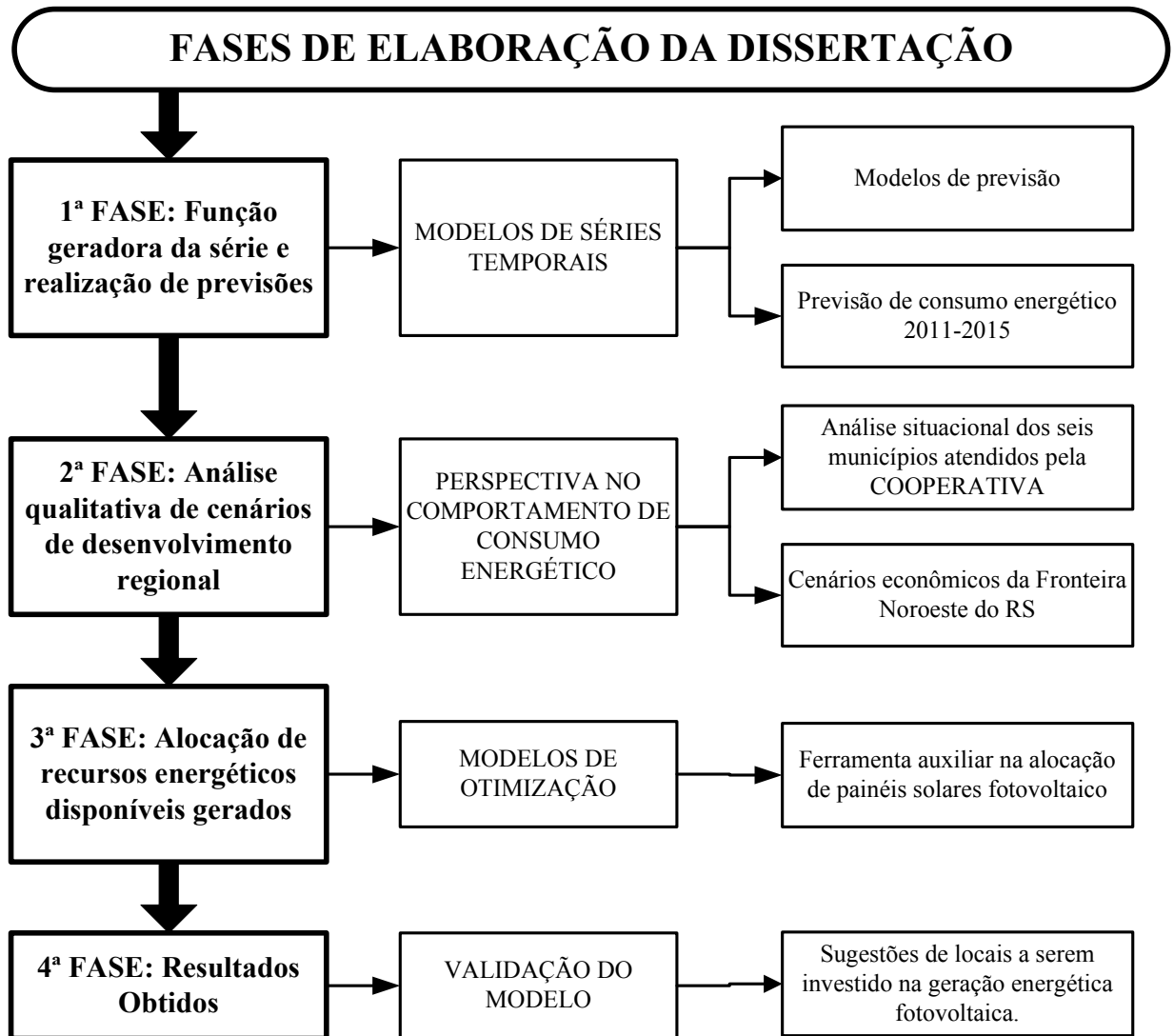


Figura 17 - Fases de elaboração e pontos abordados na dissertação.

Fonte: Elaborado pela autora

Cada vez mais estudos são realizados em relação a geração de energia fotovoltaica mas muito pouco tem se visto como a alocação de painéis pode ser feita numa cooperativa de eletrificação rural. Portanto o estudo aqui proposto é elaborar uma ferramenta que auxilie na alocação de painéis fotovoltaicos e identificar pontos potenciais de investimento na geração elétrica por meio da captura de radiação solar numa Cooperativa de Eletrificação Rural do Noroeste do RS.

O aumento na geração própria é uma das metas da cooperativa, portanto, buscou-se compreender o comportamento de consumo com previsão de séries temporais (modelos Box e

Jenkins). Foram considerados cinco anos à frente (2011-2015), tendo conhecimento do período de retorno caso ela opte por investir em painéis solares. A fim de complementar na análise de previsão, fez-se uma análise qualitativa de cenários com a metodologia de Kohler a para compreender o comportamento da região atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural.

### **3.1 Primeira Fase da Pesquisa: Modelagem inicial de consumo**

A modelagem inicial visa identificar e analisar o comportamento das séries de consumo das subestações, se as mesmas apresentam aumento ou não de consumo nos próximos 5 anos.

Nesta etapa fizeram-se visitas *in loco* a Cooperativa de Eletrificação Rural, para a coleta de dados mensais de seis subestações sendo: Km 13, Independência, Três pedras, Pedro Lazaretti, Esquina Grápia e Lajeado Patos pertencentes a municípios da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Para estimação dos modelos foi considerado o consumo mensal no período de janeiro/1999 a dezembro/2010. E, posteriormente, a previsão do consumo no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2015.

A metodologia proposta refere-se a uma pesquisa aplicada com uma abordagem quali-quantitativa, em que se partiu da análise de dados históricos de consumo para prever consumos futuros de energia elétrica. A modelagem dos dados foi organizada em quatro fases:

A Figura 18 apresenta os passos seguidos (identificação, estimação, validação) para chegar à previsão de consumo energético de cada subestação para os próximos cinco anos 2011-2015.

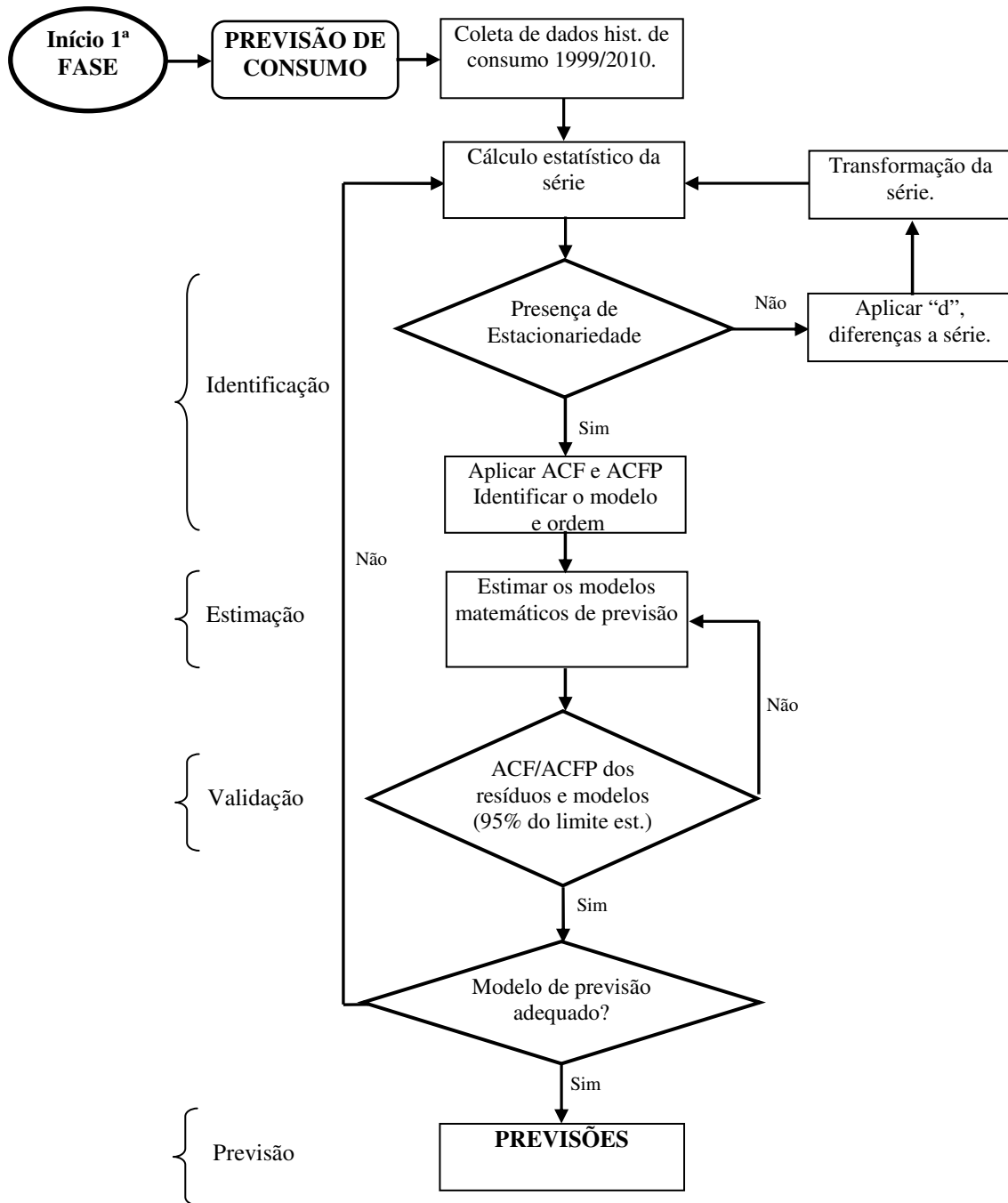


Figura 18 - Passos para a elaboração da previsão de consumo de energia elétrica.

Fonte: Adaptado de Pereira e Requeijo, 2008.

Para tal análise foi utilizado o *Eviews*<sup>®</sup> 6.0 versão estudante, onde os modelos considerados neste trabalho foram os de componente sazonal SARIMA.

Os resultados aqui obtidos foram utilizados na elaboração da ferramenta baseada em modelo de otimização para simular possíveis pontos de investimento em energia solar

fotovoltaica, onde os valores previstos oriundo dos modelos SARIMA participaram como forma de revelar a demanda de energia para os próximos cinco anos. Justificando-se assim a procura e análise de viabilidade de uma forma alternativa de geração de energia, visto que a geração hídrica está limitada geograficamente e ambientalmente.

### **3.2 Segunda Fase da Pesquisa: Análise qualitativa de cenários futuros**

Nesta fase pretende-se obter mais informações do comportamento da região atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural com análise qualitativa de cenários de desenvolvimento regional para identificar possíveis perspectivas de aumento de consumo energético que agregue com as previsões de séries temporais. Tais informações foram obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Fundação de Economia e Estatística (FEE), Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do RS (EMATER), Conselho Regional de Desenvolvimento (COREDE) Fronteira Noroeste e na própria Cooperativa de Eletrificação Rural com os técnicos responsáveis.

No segundo semestre de 2010, se propôs um estudo a uma Cooperativa de Eletrificação Rural sobre o futuro do mercado de energia elétrica da cooperativa e procurou-se conhecer as incertezas da economia da região, e identificar um possível aumento no consumo energético nos próximos cinco anos, além de se reestruturar no planejamento estratégico para aumentar sua geração própria. Os pontos abordados referem-se ao crescimento econômico que leva em consideração o PIB *per capita*, o crescimento populacional (a migração/abandono da área rural para a urbana ou demais regiões) e o *mix* de produção de grãos especificadamente a produção da soja e produção leiteira.

Além das particularidades individuais dos seis municípios que apresentam uma subestação, há o interesse em conhecer mais sobre a geração de fonte renovável, visto que a cooperativa tem a pretensão de aumentar a geração própria e melhorar o atendimento de seus usuários.

A metodologia foi organizada em etapas conforme Figura 19, baseada na metodologia de análise de Kholer. A saber:

*Etapa a:* Visando um melhor entendimento dos municípios em estudos, foram coletados dados junto a EMATER, FEE e COREDE Fronteira Noroeste, referente a migração do meio rural, PIB e mix de produção.

*Etapa b:* Na análise qualitativa de cenários utilizou-se a metodologia de Kohler, pois tal análise foi elaborada exclusivamente para a região estudada pelo Conselho Regional de Desenvolvimento (COREDE) Fronteira Noroeste.

*Etapa c:* Tendo em vista um melhor entendimento de tais localidades realizou-se uma entrevista não estruturada com a área técnica responsável da cooperativa.

*Etapa d:* Com base nas etapas acima foi possível obter uma análise de comportamento da região atendida pela Cooperativa de Eletrificação Rural.

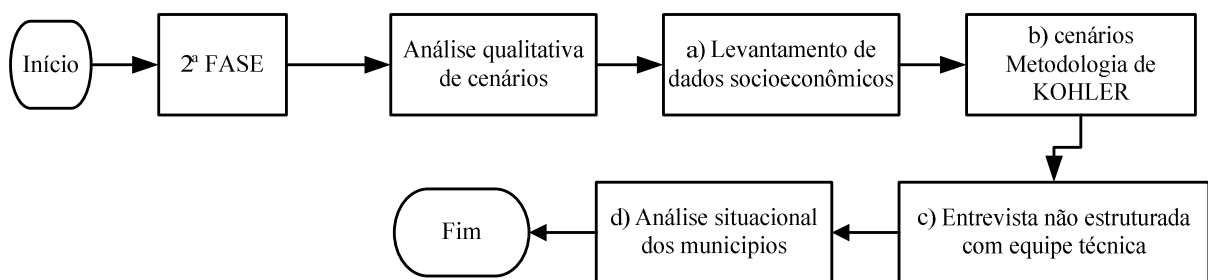


Figura 19 - Passos para a elaboração da análise qualitativa de cenários de desenvolvimento da região estudada.

Fonte: Elaborado pela autora.

Por ser uma cooperativa de eletrificação rural, a mesma fornece energia somente a área rural, sendo este o público estudado. Com esta análise, será possível identificar se a Região Noroeste do RS vem passando por alterações, mudança de comportamento que futuramente possa vir a contribuir no aumento do consumo de energia elétrica através dos dados oficiais de empresas governamentais realizados por especialistas na área.

### 3.3 Terceira Fase da Pesquisa: Alternativas de distribuição de fontes geradoras.

Dado que a geração de energia elétrica na região está restrita principalmente a fatores ambientais, há a necessidade de buscar alternativas de distribuir energia gerada por células solares fotovoltaica em virtude da radiação solar existente na região, para tal serão utilizados modelos e técnicas de pesquisa operacional (Programação Linear). Primeiramente apresenta-

se uma ferramenta hierarquizada baseada de simulação baseada em modelos de PO que analisa a usina geradora com suas subestações e, posteriormente, as subestações com seus respectivos ramais. Da análise da demanda futura do consumo de energia e dos desembolsos em investimentos na geração fotovoltaica é possível identificar os pontos estratégicos de investimentos para as subestações e os ramais.

Este modelo foi elaborado para que responda as seguintes situações: - se é viável investir em ramais e quais com os recursos pela cooperativa; - se é viável investir na subestação e/ou nos ramais, quais; - se investe nos ramais ou continuar comprando energia de outra concessionária externa ao grupo; - se investe em ramais para atender seus sub-ramais; ou ainda investir numa única usina solar que atenda todas as subestações e seus ramais. A Figura 20 destaca a sequência de etapas para a elaboração dos módulos de otimização.

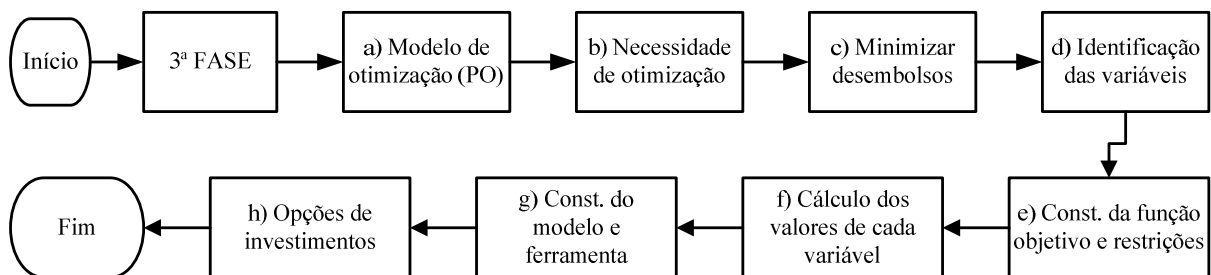


Figura 20 - Passos para a elaboração de modelos de otimização dos possíveis investimentos.

Fonte: Elaborado pela autora

- *Etapas a, b e c:* A cooperativa tem por objetivo ser mais competitiva na geração energética, para tal, busca aumentar sua geração própria, por fontes renováveis. Portanto, sente a necessidade de otimizar seus investimentos da melhor forma possível na minimização de seus desembolsos.

*Etapas d e e:* Neste estudo optou-se por delimitar as variáveis em subestações e ramais, onde a variável  $X_i$  representa a subestação  $i$  e a variável  $X_{ij}$ , o ramal  $j$  da subestação  $i$ ; ( $X_{ij}$  = ramal  $j$  da subestação  $i$ ).

Visto que inicialmente a pesquisa busca obter o consumo de cada subestação e ramais, após, elaborar uma ferramenta que simula opções de investimentos possíveis em suas subestações e ramais, e por fim, aplicação de um modelo de otimização com o intuito de



minimizar os custos e obter sugestões de investimentos. Para tal, determinou as seguintes variáveis.

As subestações foram denominadas  $i = \text{subestação} = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000$ .

Em que:

$i = 1000$  = subestação de Km 13;  $i = 2000$  = subestação de Independência;  $i = 3000$  = subestação de Três Pedras;  $i = 4000$  = subestação de Pedro Lazaretti;  $i = 5000$  = subestação de Esquina Grápia;  $i = 6000$  = subestação Lajeado Patos.

Para os ramais estudados determinou-se  $j = \text{ramais}$ , para cada uma das seis subestações. Para:

$$\begin{aligned} i_{1000} &= j = 1, 2, 3 \dots 170; & i_{2000} &= j = 1, 2, 3 \dots 147; & i_{3000} &= j = 1, 2, 3 \dots 83; \\ i_{4000} &= j = 1, 2, 3 \dots 80; & i_{5000} &= j = 1, 2, 3 \dots 14; & i_{6000} &= j = 1, 2, 3 \dots 78; \end{aligned}$$

Após identificar os números de subestações e de ramais, fez-se necessário conhecer os investimentos, tais como:

$X_i$ : é binário (instalar ou não instalar) usina fotovoltaica na subestação  $i$ ;

$X_{ij}$ : instalar usina fotovoltaica no ramal  $ij$ ;

$a_i$ : Investimento de usina solar na subestação  $i$ ;

$a_{ij}$ : Investimento na capacidade da linha do ramal  $ij$ ;

$b_i$ : Investimento em linha da subestação  $i$ ;

$b_{ij}$ : Investimento em linha do ramal  $ij$ ;

$G_i$ : Custo de geração na subestação  $i$ ;

$G_{ij}$ : Custo de geração no ramal  $ij$ ;

$M_i$ : Custo de manutenção da subestação  $i$ ;

$M_{ij}$ : Custo de manutenção do ramal  $ij$ ;

A função minimizada foi representada pela equação (37).

$$(37) \quad \text{Minimizar } C = I_G + I_L + C_G + C_M$$

Em que:

$C = \text{custos};$

$I_G = \text{Investimento em geração};$

$I_L = \text{Investimento em linhas de transmissão};$

$C_G = \text{Custo de Geração};$

$C_M = \text{Custo em Manutenção}$

A função objetivo de cada subestação será conforme apresentada na equação (38).

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & ( a_i + b_i + G_i + M_i ) \times X_i + \dots + \\ & + ( a_{ij} + b_{ij} + G_{ij} + M_{ij} ) \times X_{ij} \end{aligned} \quad (38)$$

Sujeito a:

$$\begin{array}{rcl} X_i + X_{ij} & \leq & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ X_{ij} + X_{ij} & \leq & 1 \\ (a_i + b_i) \times X_i + \dots + (a_{ij} + b_{ij}) \times X_{ij} & \leq & R\$ \\ kW_T \quad kW_{ij} \dots & \dots & kW_{ij} \leq kW_T \end{array}$$

- *Etapa f:* Nas Figuras 21 e 22 resume como os dados devem ser organizados na planilha do Excel , e como os mesmos estão interligados formado as variáveis do modelo. Cada planilha apresenta cálculo de investimento e custo de geração energética fotovoltaica de cada subestação e ramal, conforme Figura 22.

O valor da célula D 4 foi buscado da planilha de A de invest. na célula E 6.

D4			
A	B	C	D
SUBESTAÇÕES			
			X <sub>1000</sub>
	INVEST. PAINÉIS	A	4.363.485,00
	INVEST. LINHAS	B	820.583,68
1000	CUSTO GERAÇÃO	G	0
	CUSTO MANUT.	M	303.693,68
	TOTAL INVEST.	A+B	5.184.068,68
	DESEMBOLSO TOTAL	A+B+G+M	5.487.762,36

O valor encontra-se na célula E6

E6				
A	B	C	D	E
CÁLCULOS DE INVESTIMENTOS EM USINAS FOTOVOLTAICAS				
2	SUBESTAÇÕES	Valor/R\$ em placas fotovoltaicas		
3		para gerar kW desta subestação		a <sub>1000</sub>
4	1000	RS_PAINÉIS	6.240,00 PROPOR./CONSUMO	
5		RS_INVERSORES	3.791,00 CONSUMO_KW	435
6		RS_INVESTIMENTOS		4363485

Figura 21 – Exemplo de interligações entre as planilhas.

Fonte: Elaborada pela autora.

Cada planilha tem seus cálculos e ambos estão interligados, quando for alterado o valor de placas, inversos ou até mesmo para simular um valor maior em kW que se queira gerar e simular ele altera automaticamente já informando o desembolso total. Observa-se na Figura 21 um exemplo.

CÁLCULOS DE INVESTIMENTOS EM USINAS FOTOVOLTAICAS NA SUBESTAÇÃO E RESPECTIVOS RAMAIS										
SUBESTAÇÕES										
1000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a1000	a1001	a1002	a1003	a1005	a1006	a
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	435	0,005	0,005	0,004	0,010	0,006	0
			R\$ INVESTIMENTOS	4363485	21817,425	21817,425	17453,940	43634,850	26180,910	218
2000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a2000	a2001	a2002	a2003	a2005	a2006	a
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	449	0,003	0,007	0,008	0,006	0,005	0
			R\$ INVESTIMENTOS	4503919	13511,757	31527,433	36031,352	27023,514	22519,595	630
3000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a3000	a3001	a3002	a3003	a3005	a3006	a
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	67	0,012	0,020	0,009	0,017	0,015	0
			R\$ INVESTIMENTOS	672077	8064,924	13441,540	6048,693	11425,309	10081,155	604
4000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a4000	a4001	a4002	a4003			
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	132	0,019	0,010	0,009			
			R\$ INVESTIMENTOS	1324092	25157,748	13240,920	11916,828			
5000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a5000	a5001	a5002	a5003			
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	30	0,070	0,100	0,270			
			R\$ INVESTIMENTOS	300930	21065,100	30093,000	81251,100			
6000	R\$ PAINÉIS	6.240,00	PROPOR./CONSUMO	a6000	a6001	a6002	a6003	a6005	a6006	a
	R\$ INVERSORES	3.791,00	CONSUMO_KW	181	0,012	0,017	0,010	0,013	0,017	0
			R\$ INVESTIMENTOS	1815611	21787,332	30865,387	18156,110	23602,043	20865,387	181

Figura 22 – Planilha para estruturação de cálculos de desembolso na geração de energia solar fotovoltaica.

Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação aos valores utilizados, estes foram obtidos de empresas especializadas em materiais fotovoltaicos, os recursos e valores de investimento foram coletados da própria cooperativa e os kW utilizados referem-se aos que foram previstos pelos modelos de séries temporais.

Sabe-se que uma placa de  $2\text{m}^2$  gera 200 watts e que custa em torno de R\$ 1.248,00, portanto o custo para gerar 1 kW = R\$ 6.240,00, isto em placas. Mas neste sistema ainda é necessário saber o custo de inversores, que variam de acordo com a potência desejada. Atualmente pesquisas de preços demonstraram que um inversor de 1 watt custa 1,70 euros, ou seja R\$ 3,79/Watts ( $1,70 \times 2,23$ ), então 1 kW/h custa R\$ 3.791,00.

Os cálculos das variáveis de investimentos em usinas solares ( $a_i$ ) e ramais ( $a_{ij}$ ) são as seguintes: kW necessário para suprir o consumo nos próximos cinco anos multiplicado pelo valor dos painéis, mais a multiplicação dos kW com os inversores ( $(\text{kW} \times 6.240,00) + (\text{kW} \times 3.791,00) = \text{R\$}$ . Desta mesma forma é feito com os ramais.

Para investimentos em linhas “b”, foram mensurados o total de quilometragem da mesma e o valor anual que a empresa investe distribuídos proporcionalmente entre as seis subestações e os seus ramais. Exemplo:  $(\text{Km} \times \text{R\$ por Km}) = \text{R\$}$ .

Os custos de geração “G” tanto para as linhas das subestações como dos ramais foi considerado “zero”, pois, a radiação solar esta disponível.

Para os custos de manutenção “M” das subestações e ramais considerou-se o percentual de 5% do valor do faturamento adotado pela cooperativa,  $(\text{Faturamento} \times 0,05 = \text{R\$ disponíveis para manutenção})$ . Sendo este, distribuído proporcionalmente de acordo com a quilometragem de cada subestação e ramal. Exemplo,  $(\text{km} \times \text{R\$ por Km} = \text{R\$})$ .

Após o cálculo de cada variável, fez-se a soma dos investimentos e custos dos mesmos considerando assim o total de desembolso da cooperativa.

A elaboração do modelo apresenta-se de acordo com as etapas “g” e “h”.

- *Etapas g e h*: Como o sistema fotovoltaico apresenta um número maior de variáveis se comparado com o hídrico fica difícil identificar dentro de seus 572 em qual investir. Se não tiver recursos suficiente em qual das seis subestações investir primeiro? A ferramenta hierarquizada permite que se faça uma análise primeiramente para a escolha da subestação e em seguida no solver identificar os pontos sugeridos para o investimento dentro do orçamento proposto pela cooperativa. A ferramenta apresenta-se da seguinte forma (Figura 23).

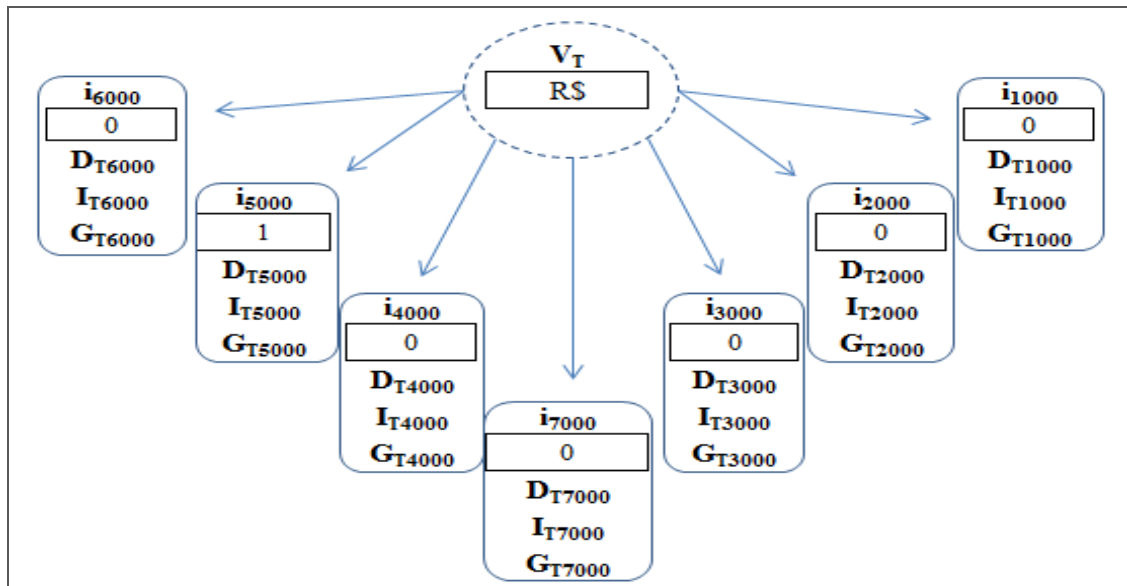


Figura 23 – Ferramenta hierárquica de simulação.

Fonte: Elaborada pela autora.

A simulação ocorre por meio do solver no Excel. Nos quadros se for colocado “zero = 0” quer dizer que não será investido naquela subestação, se for colocado o número “um = 1” significa que será feito o investimento e na célula “ $V_t$ ” (Valor total em R\$) onde demonstrará o valor do investimento naquela subestação, se for colocado o número “um” em mais de uma subestação os valores das mesmas se somam e assim vai sendo feita as simulações, da qual a cooperativa vai tomando suas decisões de investimento e decidindo de acordo com o valor que a PCH tem disponível. Esta simulação é específica para as subestações, mas se não tiver recursos disponíveis para investir em todos os ramais, então prossegue para a segunda parte que é aplicar o solver para identificar os pontos potenciais de investimentos.

Na planilha eletrônica do Excel os dados são apresentados conforme a Figura 24, os algarismos romanos indicam no solver o que esta sendo abordado.

- I. Desembolso total da cooperativa em relação a cada subestação e seus respectivos ramais;
- II. Investimento total em usina e linhas das subestações e dos ramais;
- III. Refere-se à quantidade de energia que terá que ser gerada no período de 5 anos;
- IV. Sugere se é viável investir na subestação ou nos ramais e quais;
- V. Mostra o valor total do investimento sugerido;



The image shows the Microsoft Excel Solver interface. The Solver Parameters dialog box is open, showing the following settings:

- Definir célula de destino:  $\$L\$4$
- Igual a:  Máx.  Mín.  Valor de: 0
- Células variáveis:  $\$C\$4:\$I\$4$
- Submeter às restrições:
  - $\$C\$4:\$I\$4 = \text{binario}$
  - $\$J\$12 = \$L\$12$
  - $\$J\$5:\$J\$11 \leq \$L\$5:\$L\$11$

The spreadsheet data is as follows:

		X <sub>7000</sub>	X <sub>7001</sub>	X <sub>7002</sub>	X <sub>7003</sub>	X <sub>7004</sub>	X <sub>7005</sub>	X <sub>7006</sub>	
a+b+C+M		17.166.092,10	4.364.287,37	5.345.930,82	1.395.258,96	2.189.454,21	139.870,58	3.733.522,21	
		1	0	0	0	0	0	0	
		1	1						1
		1		1					1
		1			1				1
		1				1			1
		1					1		1
		1						1	1
a+b		16.029.939,00	4.060.593,68	5.050.290,25	1.193.516,02	1.913.406,78	109.111,01	3.705.253,29	16029939
ENERGIA		1292	323	423,776	64,6	116,28	2,584	361,76	1292

Annotations in red text:

- "Sugestão de Investimento 'investir numa única usina'." (next to row 4)
- "Valor necessário para este investimento" (next to cell L4)
- "Valor em R\$ que a cooperativa tem disponível para investir na geração fotovoltaica para gerar os 1292 kWp." (next to cell L11)

At the bottom of the Excel window, the status bar reads: "Planilha com valores interligados".

Figura 25 – Estrutura dos modelos de otimização de Programação Linear Inteira no Solver.

Fonte: Dados do trabalho.



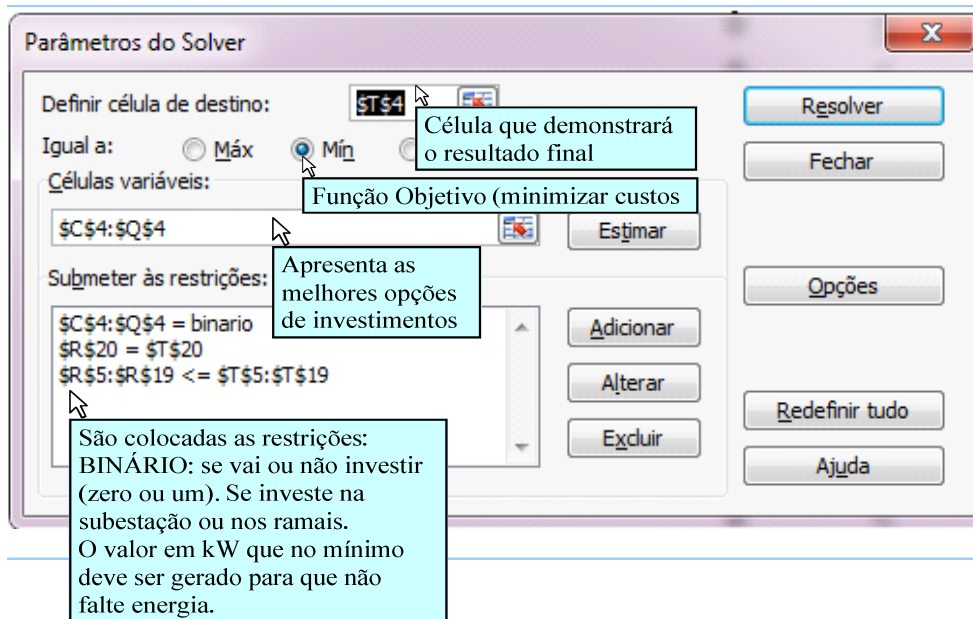


Figura 26 – Preenchimento da janela “Parâmetros do Solver”.

Fonte: Dados do trabalho.

Após acrescentar todos os dados, clica-se em resolver e se obtém os pontos ótimos de solução. Desta forma a cooperativa em questão pode trabalhar com várias possibilidades de investimentos de todas as suas subestações e ramais.

### 3.4 Quarta Fase da Pesquisa: Resultados

Nesta fase fez-se as simulações como forma de validação da ferramenta e modelos de otimização, para identificação dos possíveis pontos de investimento em painéis fotovoltaicos nas seis subestações e seus 572 ramais.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia proposta a dados reais do consumo de energia elétrica de seis subestações de uma cooperativa de eletrificação rural da região noroeste. O mesmo encontra-se dividido em quatro seções onde são utilizadas técnicas de séries temporais, incluindo modelos SARIMA de BOX e JENKINS, análise qualitativa de cenários com objetivo de obter perspectivas de consumo de energia elétrica da cooperativa rural, além de técnicas e modelos de pesquisa operacional por meio de programação linear inteira.

### **4.1 Empresa de Eletrificação Rural: histórico**

A Cooperativa de Eletrificação Rural entre Rios Ltda. surgiu em 1969, com o objetivo de suprir a necessidade de oferecer força e luz para a população do interior da região noroeste do RS, através da implantação das redes de distribuição de energia elétrica, satisfazendo uma das necessidades básicas rurais.

Preocupada em distribuir energia elétrica com qualidade, assim como demais serviços prestados, para que com seu uso o homem do campo promova seu desenvolvimento e do meio onde vive, oferecendo-lhe além de energia, força e luz, todo o conforto necessário ao convívio humano. Nos anos 90, mais precisamente em 1999, foi inaugurada a Usina Hidrelétrica Buricá, com uma potência instalada de 1400 kW, beneficiando mais de 3000 famílias.

Em 2009, a cooperativa, passa a trabalhar na adaptabilidade às novas regras do setor elétrico brasileiro da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, onde se divide em duas Cooperativas distintas, a Cooperativa de Distribuição e a Cooperativa de Desenvolvimento.

A Cooperativa de Distribuição desenvolve as atividades de distribuição e manutenção das redes de energia elétrica. A Cooperativa de Desenvolvimento desempenha as atividades ligadas a geração de energia elétrica, ficando em seu patrimônio a Usina Buricá I e o projeto da Usina Buricá II, a participação no projeto da Usina do rio Jacuí, indústria de artefatos e cimento, a metalúrgica que fabrica pavilhões pré-moldados, iniciando no ramo de prestação de serviços especializados com caminhão guindaste, perfuratriz e detonação.

Neste mesmo ano o número de beneficiados com o programa Luz para Todos foi de 705 famílias e em 2010 mais 102 famílias. Totalizou-se um consumo de 24.768,79 Gwh.

Em 2011 a empresa conta com 7574 associados de 12 municípios atendidos. Este histórico foi elaborado com base em informações obtidas em Damm (2007) e Cooperativa de Eletrificação Rural (2009).

#### 4.2 Modelos de Previsão de consumo de energia elétrica

Os dados coletados são de seis subestações, sendo, Km 13, Independência, Três Pedras, Pedro Lazaretti, Esquina Grápia e Lajeado Patos. A localização das mesmas pode ser visualizada na Figura 27. Ao todo foram 132 observações em cada local, referente ao consumo energético do período de janeiro de 1999 a dezembro de 2009.

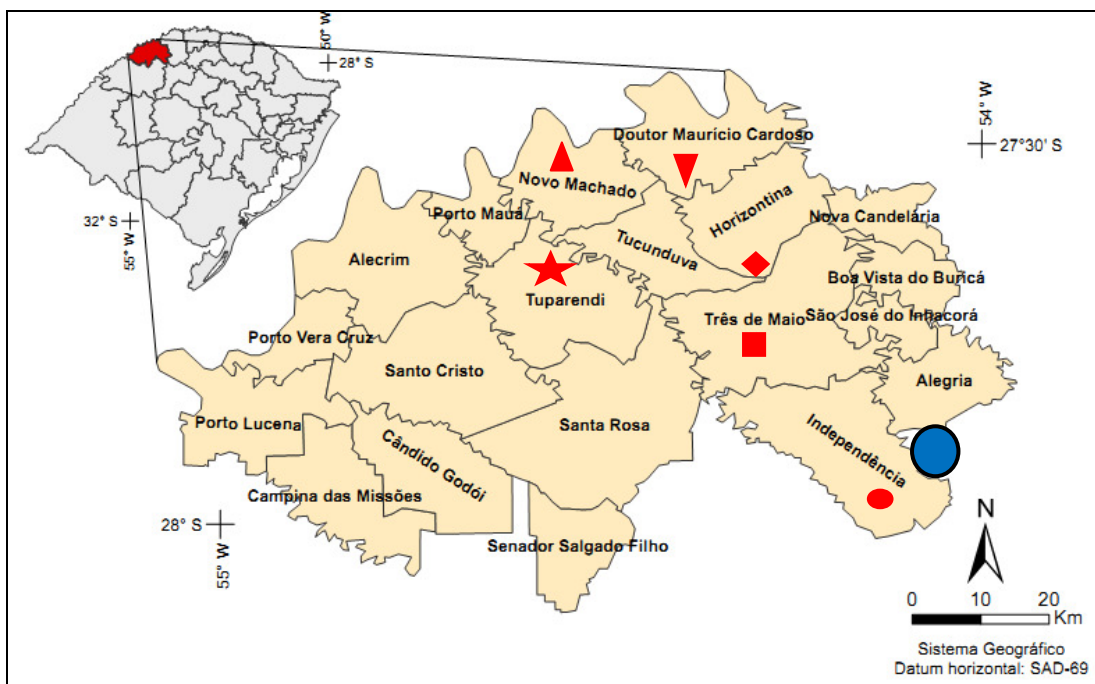


Figura 27 - Localização das subestações estudadas.

Fonte: COREDE Fronteira Noroeste do RS, 2011

Legenda:

- Subestação de Km13
- Subestação de Independência
- ▲ Subestação de Três Pedras

- Usina da Cooperativa
- ★ Subestação Pedro Lazaretti
- ▼ Subestação de Esquina Grápia
- ◆ Subestação Lajeado Patos

Os dados de consumo energético é kWh. O comportamento de consumo energético total das Subestações pode ser acompanhado nas seções 4.2.1 a 4.2.2.

#### 4.2.1 Etapa de Identificação

Observa-se na análise gráfica da Figura 28 o comportamento mensal do consumo de energia para cada subestação no período de 11 anos.

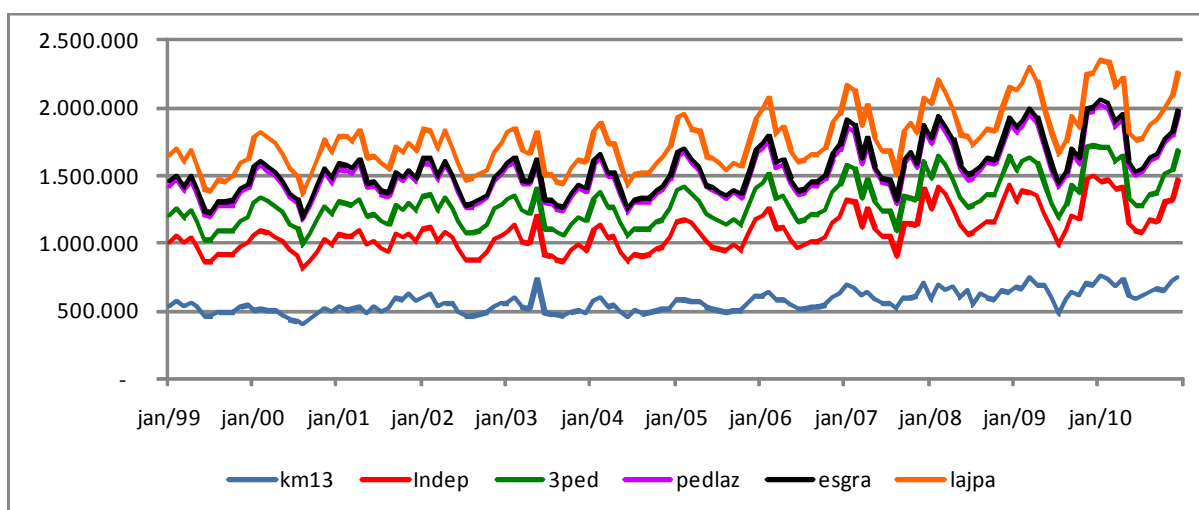


Figura 28 - Consumo mensal de eletricidade.

Fonte: Dados da pesquisa

Nesta fase é importante observar o comportamento da série quanto a presença de tendência e sazonalidade. Referente à presença de tendência, este comportamento foi confirmado para as subestações de Km 13, Independência, Pedro Lazaretti e Lajeado Patos na aplicação do teste de *Wald-Wolfowitz* com nível de significância de 0,05. Já para as subestações de Três Pedras ( $p\text{-valor} = 0,1700$ ), Pedro Lazaretti ( $p\text{-valor} = 0,193$ ) e Esquina Grápiã ( $p\text{-valor} = 0,660$ ) a tendência não foi confirmada com  $p\text{-valor} > 0,05$ . As séries de dados bipartidas com 72 dados em cada uma. Foi testada a hipótese nula de que as duas séries pertencem à mesma população.

A presença de sazonalidade foi confirmada pelo teste de *Kruskal-Wallis*, com *p-valor* = 0,000, para as subestações de Km 13, Independência, Pedro Lazaretti, Três Pedras, Esquina Grápia e Lajeado Patos, em que a  $H_0$  foi rejeitada a um nível de significância de 0,05. Esta hipótese foi rejeitada porque o *p-valor* encontrado para as subestações foi inferior a 0,05.

Quanto à presença de estacionariedade foi mensurada pelo teste Dickey Fuller (ADF) conforme pode se observado na Tabela 03, que apresenta a estacionariedade das seis subestações. A hipótese de não estacionariedade foi rejeitada em nível de 5% de significância sendo necessário diferenciá-las nas subestações de Três pedras, Pedro Lazaretti e Esquina Grápia. Já para as subestações de Km13, Independência e Lajeado Patos, a série apresentou-se estacionária sem precisar diferenciar.

Tabela 03 - Resultado do teste de estacionariedade das séries.

SUBESTAÇÕES	ADF p-valor aceitável $\alpha < 0,05$	*ADF p-valor aceitável $\alpha < 0,05$
Km 13	0,0000	-
Independência	0,0000	-
Três Pedras	0,9137 *	0,0000
Pedro Lazaretti	0,8728 *	0,0000
Esquina Grápia	0,9325 *	0,0000
Lajeado Patos	0,0003	-

\*Teste ADF estacionária com uma diferença.

Fonte: Dados da pesquisa

Confirmada a estacionariedade, a próxima etapa de análise consiste em avaliar as funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (ACFP) da série. A partir do comportamento destas funções se decide o tipo de filtro que será utilizado para fazer a modelagem (AR, MA, ARIMA ou SARIMA). A Figura 29 representa a ACF e a ACFP de todas as séries das seis subestações.

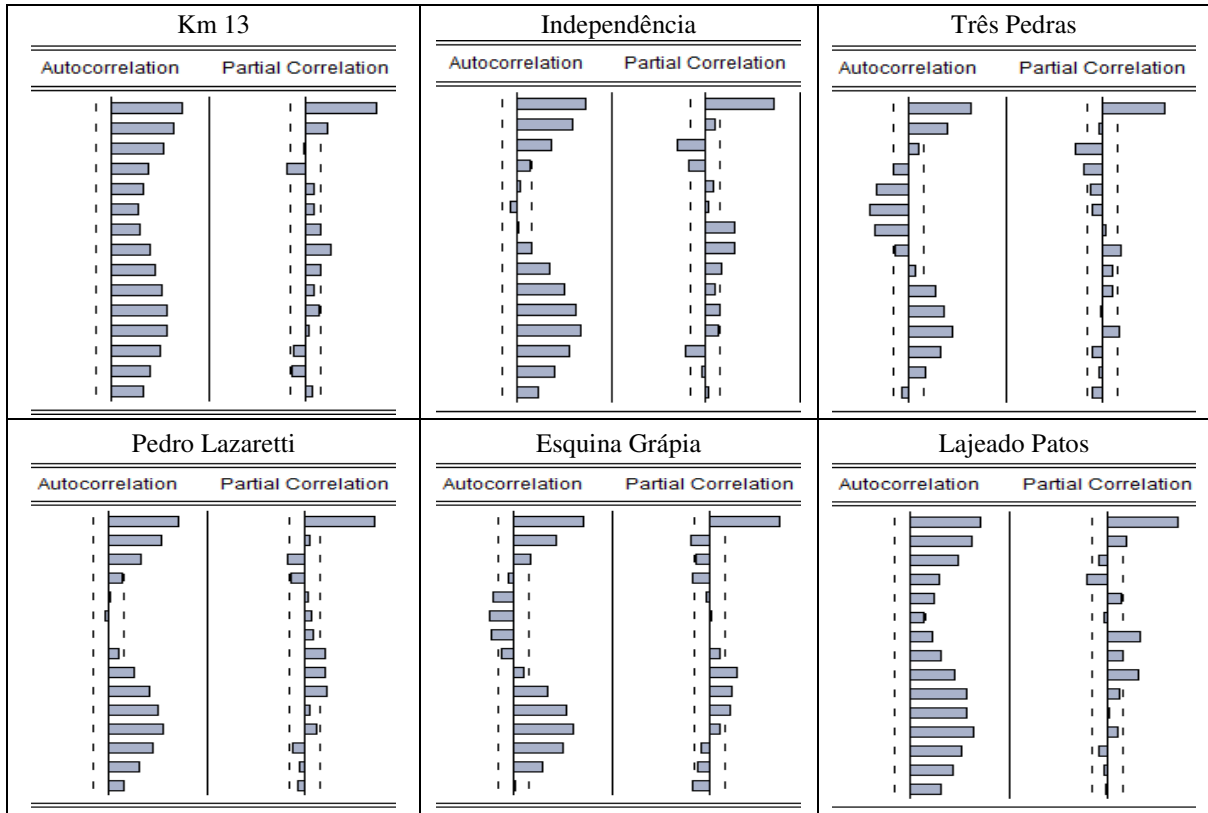


Figura 29 - ACF e ACFP das subestações em nível.

Fonte: Dados da Pesquisa

Pode ser observado que a ACF das séries de consumo de energia elétrica apresentam um decaimento senoidal indicando um modelo sazonal SARIMA, já a ACFP evidenciou presença de sazonalidade.

#### 4.2.2 Etapa de Estimação

Na estimação dos parâmetros do modelo proposto, SARIMA de ordem 1, e na análise das variâncias dos resíduos, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários.

Portanto o modelo mais indicado para as seis subestações foi o mesmo sendo: SARIMA (1,1,1) (0,1,1)<sub>12</sub>. O que evidenciou que nem todos os modelos foram condizentes com o teste de estacionariedade ADF, pois as subestações de Três Pedras, Esquina Grápia e Pedro Lazaretti apresentaram estacionariedade sem precisar diferenciá-las. O referido

parâmetro das subestações escolhido dentre os demais concorrentes serão apresentados na etapa de verificação.

#### 4.2.3 Etapa de Verificação

Após a identificação dos modelos pela ACF e ACFP, faz-se a representação dos modelos significativos que melhor representam o comportamento da série de consumo de energia elétrica das subestações da CERTHIL, por meio da análise de seus ruídos brancos, em que caso de resultado negativo, um novo modelo é estimado.

Embora no teste de estacionariedade as subestações de Três Pedras, Esquinas Grápia e Pedro Lazaretti apresentaram-se estacionárias sem diferenciá-las, dentre os modelos concorrentes o melhor modelo para ambas foi com a mesma diferenciada. Na Tabela 04, pode ser observado os melhores modelos propostos após uma escolha dentre modelos concorrentes em que se considerou o menor valor de AIC e SBC, além de um menor valor de U de Theil.

Tabela 04 - Características dos modelos propostos de previsão.

Subestações	Modelo	Coefficientes	Crítérios AIC e SBC	p-valor	Erro-padrão	U de Theil
Km13	SARIMA (1, 1, 1) x (0, 1, 1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = -0,739$	AIC = 24,09 SBC = 24,15	0,000	0,078	0,037
		$\phi_2 = -0,577$		0,000	0,088	
		$\theta_{12} = -0,906$		0,000	0,024	
Indepen - dência	SARIMA (1, 1,1) x (0, 1,1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = -0,7710$	AIC = 24,23 SBC = 24,430	0,000	0,082	0,131
		$\phi_2 = -0,6464$		0,000	0,080	
		$\theta_{12} = -0,5744$		0,000	0,092	
Três Pedras	SARIMA (1, 1,1) x (0, 1,1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = -0,2522$	AIC=21,57 SBC=21,64	0,036	0,119	0,077
		$\phi_2 = -0,8115$		0,000	0,072	
		$\theta_{12} = -0,873$		0,000	0,034	
Pedro Lazaretti	SARIMA (1, 1,1) x (0, 1,1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = 0,2835$	AIC=22,03 SBC=22,10	0,013	0,113	0,036
		$\phi_2 = -0,8541$		0,000	0,061	
		$\theta_{12} = -0,9053$		0,000	0,029	
Esquina Grápia	SARIMA (1, 1,1) x (0, 1,1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = -0,626$	AIC = 19,00 SBC =19,06	0,000	0,081	0,080
		$\phi_2 = -0,467$		0,000	0,088	
		$\theta_{12} = -0,9295$		0,000	0,016	
Lajeado Patos	SARIMA (1, 1,1) x (0, 1,1) <sub>12</sub>	$\phi_1 = -0,756$	AIC = 21,89 SBC = 21,95	0,000	0,070	0,051
		$\phi_2 = -0,731$		0,000	0,074	
		$\theta_{12} = -0,866$		0,000	0,026	

Fonte: Dados da pesquisa

Na análise dos resíduos do modelo encontrado observa-se que estes satisfazem a pressuposição de média zero e variância constante caracterizando-se assim, como ruído branco. Observa-se ainda a FAC e FACP dos modelos propostos (Figura 30), onde indicam que as autocorrelações estão todas dentro dos limites de confiabilidade em nível de 95%, deste percentual é aceito 5% excedente do limites de confiabilidade como pode ser observado em Independência, Três Perdas e Lajeado Patos.

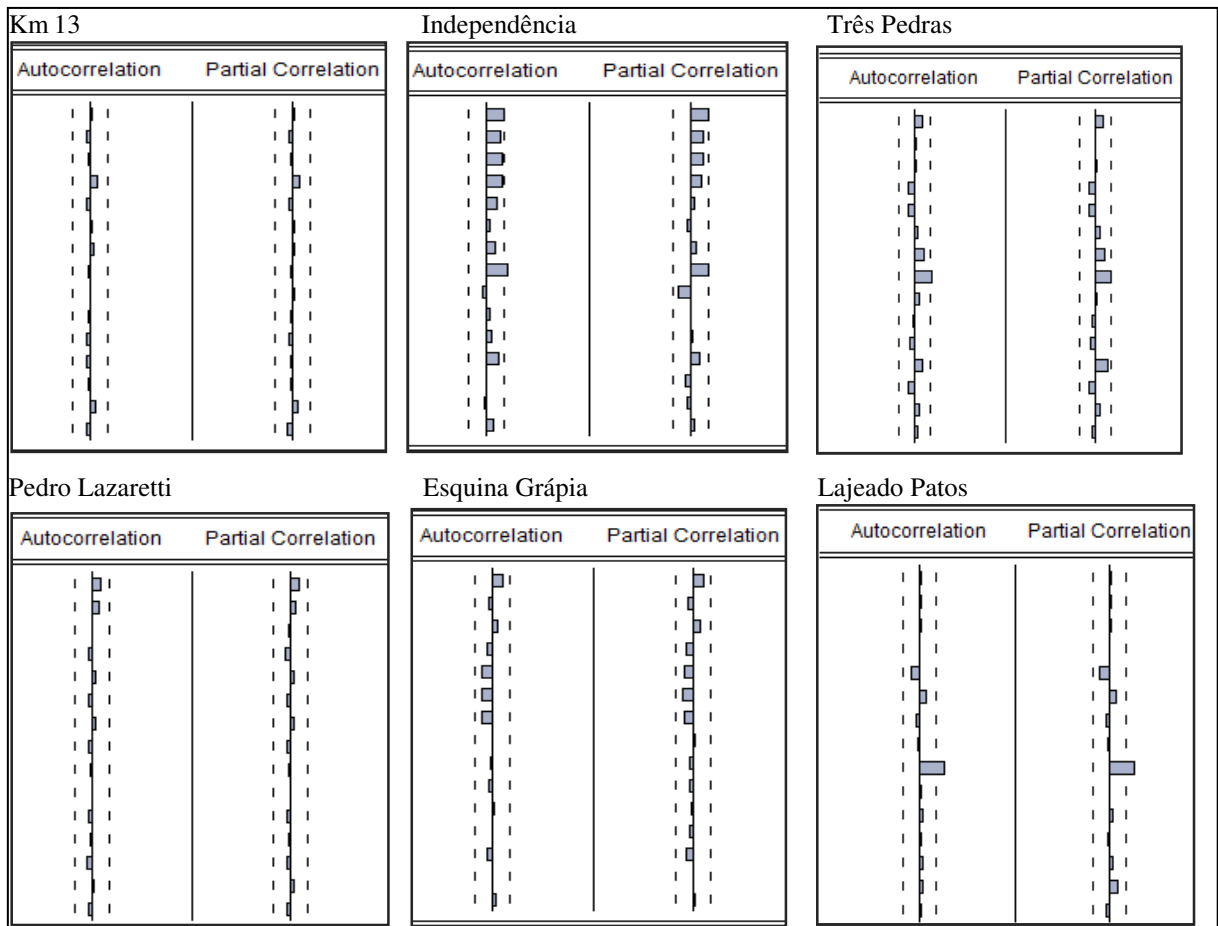


Figura 30 - FAC e FACP dos resíduos da série de consumo com eletricidade das seis subestações da CETHIL.

Fonte: Dados da pesquisa



#### 4.2.4 Etapa de Previsão

Após encontrar o melhor modelo de previsão de seus concorrentes pelo *software Eviews 6.0 versão estudante* fez-se previsão para conhecer um possível aumento no consumo energético nos próximos cinco anos, conforme apresentado na Tabela 05. Tal previsão se faz necessária, pois como a empresa pretende investir em painéis solares, o período de retorno de investimento tem que ser considerado.

De acordo com as previsões para os próximos cinco anos a cooperativa terá que se preparar para gerar ou comprar 1292 kW.

Tabela 05 - Estimativa de consumo energético de 2011-2015 da CERTHIL, RS.

SUBESTAÇÕES	2011	2012	2013	2014	2015	Total kW
<b>Km 13</b>	100	91	81	81	81	435
<b>Independência</b>	78	97	91	91	91	449
<b>Três Pedras</b>	-6	14	20	20	20	67
<b>Pedro Lazaretti</b>	16	30	29	29	29	132
<b>Esquina Grápia</b>	5	6	6	6	6	30
<b>Lajeado Patos</b>	40	40	34	34	34	181
<b>Total Kw</b>	233	277	261	261	261	<b>1292</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Cabe salientar que esta previsão de consumo obtida é válida apenas para esta pesquisa, pois é um aumento vegetativo em que o mesmo pode ser alterado, conforme perspectivas apresentadas nos estudos de cenários na seção 4.3. Ou seja, a cada nova mudança no comportamento da região este consumo pode oscilar para mais ou para menos em que a cooperativa rapidamente deve intervir para que não falte energia, ou até mesmo aumentar ainda mais sua geração própria.

### 4.3 Cenários de desenvolvimento regional: análise qualitativa

A região em estudo sempre obteve destaque pela produção de grãos e hoje se evidencia na bacia leiteira, da qual, serão analisadas perspectivas de comportamento no *mix* destes dois setores, e demais aspectos que possam contribuir para o aumento no consumo de energia elétrica.

Faz-se necessário conhecer o comportamento dos seis municípios que contém uma subestação da cooperativa quanto a suas premissas demográficas que podem contribuir para um aumento no consumo de eletricidade, para tal, as próximas seções apresentam a situação atual dos municípios em relação à região e estado.

Para a apresentação do diagnóstico da região e em especial dos seis municípios atendidos pela Cooperativa utilizou-se como base o método de Kholer (2006) que analisa o crescimento populacional e migração da área rural, crescimento do PIB e PIB *per capita*. Além de uma análise sobre a mudança de comportamento da região em relação à produção de grãos e setor leiteiro. Atualmente há uma mescla das duas atividades.

Quanto ao crescimento populacional, e a migração da área rural utilizou-se as taxas de crescimento dos Censos Demográficos de 2000, 2007 e 2011, e dados da Fundação de Economia e Estatística - FEE, 2011 conforme pode ser observado na Tabela 06.

Tabela 06 - Crescimento anual da população da área Urbana e Rural do Noroeste Gaúcho em %.

Municípios	1991			2000			2008			2010		
	Rural	Urbana	Q	Rural	Urbana	Q	Rural	Urbana	Q	Rural	Urbana	Q
Três de Maio	39,86	60,14	II	26,56	73,44	II	19,77	80,23	I	20,08	79,92	I
Independência	56,79	43,21	IV	45,44	54,56	IV	38,08	61,92	IV	37,19	62,81	IV
Novo Machado	-	-	-	68,29	31,71	IV	58,09	41,91	IV	60,45	39,55	IV
Tuparendi	59,35	40,65	IV	46,48	53,52	IV	37,99	62,01	IV	30,70	69,30	IV
Doutor Mauricio Cardoso	67,36	32,64	IV	58,62	41,38	IV	49,45	50,55	IV	50,71	49,29	IV
Horizontalina	26,72	73,28	II	22,48	77,52	II	19,74	80,26	I	20,59	79,41	I
<b>Total região</b>	<b>47,27</b>	<b>52,73</b>		<b>38,94</b>	<b>61,06</b>		<b>32,68</b>	<b>67,32</b>		<b>29,45</b>	<b>70,55</b>	
<b>Total estado</b>	<b>23,44</b>	<b>76,56</b>		<b>18,35</b>	<b>81,65</b>		<b>14,97</b>	<b>85,03</b>		<b>14,89</b>	<b>85,10</b>	

Fonte: Adaptado de FEE, 2011.

Observa-se que até o ano de 2000 os municípios de Três de Maio e Horizontina encontravam-se no Quadrante II, ou seja, o desempenho destes municípios está melhor que a média regional, e pior que a estadual. Percebe-se também que em 2007 estes municípios excederam a média regional e estadual, passando a ingressar o Quadrante I. Os demais municípios da região situam-se no Quadrante IV, com desempenho inferior a região e ao estado, o que ainda representa um ruralismo, merecendo destaque os municípios de Novo Machado e Doutor Mauricio Cardoso que apresentam conforme dados obtidos, populações rurais superiores a urbana.

Ao longo dos 10 anos analisados houve uma migração de 17,82% da área rural, mas de acordo com os dados históricos da cooperativa, o consumo de energia neste meio tem aumentado em média 2% ao ano. Quanto ao PIB, conforme pode ser observado na Tabela 07, os municípios que apresentam taxas de crescimento superior a região e ao estado, são os municípios de Três de Maio e Horizontina, os demais municípios tiveram taxas de crescimento inferior. Mas na média, o desenvolvimento dos seis municípios encontra-se superior ao apresentado pela região, perdendo para o desenvolvimento estadual (quadrante II).

Tabela 07 - Evolução do PIB nos municípios da região noroeste do RS de 2003 a 2010.

<b>Municípios</b>	<b>2003</b>	<b>2005</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>Q</b>
Três de Maio	255.560	251.009	378.923	407.788	I
Independência	80.931	57.114	94.404	98.717	IV
Novo Machado	47.713	25.475	49028	53.602	IV
Tuparendi	95.477	77.182	114.231	92.704	IV
Doutor Mauricio Cardoso	64.533	44.676	78.237	87.981	IV
Horizontina	596.175	429.633	490.925	541.281	I
<b>Seis municípios</b>	<b>190.065</b>	<b>147.515</b>	<b>200.958</b>	<b>213.679</b>	<b>II</b>
<b>Região</b>	<b>132.889</b>	<b>115.435</b>	<b>156.416</b>	<b>179.038</b>	
<b>Estado</b>	<b>251.111</b>	<b>290.762</b>	<b>356.079</b>	<b>362.381</b>	

Fonte: Adaptado de FEE, 2011.

Na análise do PIB, os seis municípios apresentaram um aumento nos últimos 5 anos de 12,42% o que evidencia uma região ainda que abaixo da média estadual em crescimento. Na análise do PIB *per capita* dos seis municípios em relação à região e ao Estado, Horizontina é o município que tem se destacado por apresentar uma média superior a ambas, Três de Maio apresenta um PIB *per capita* superior a região, mas inferior ao estado, os demais municípios

apresentam um crescimento inferior a média estadual e regional, conforme pode ser observado na Tabela 08.

Tabela 08 - Evolução do PIB *per capita* de 1999 a 2008 dos seis municípios estudados.

<b>Municípios</b>	<b>2002</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>Q</b>
Três de Maio	8.472	12.781	16.239	17.037	II
Independência	7.531	9.821	14.134	14.571	IV
Novo Machado	6.741	5.984	11.546	12.486	IV
Tuparendi	10.802	10.263	12.991	14.193	IV
Doutor Mauricio Cardoso	7.365	10.619	14.240	15.959	II
Horizontina	22.262	19.805	26.819	28.469	I
<b>Seis municípios</b>	<b>10.529</b>	<b>11.546</b>	<b>15.995</b>	<b>17.119</b>	<b>II</b>
<b>Região</b>	<b>7.205</b>	<b>12.020</b>	<b>15.582</b>	<b>15.174</b>	
<b>Estado</b>	<b>10.057</b>	<b>14.304</b>	<b>16.688</b>	<b>18.378</b>	

Fonte: Adaptado de FEE, 2011.

Na média, se comparado os seis municípios, ambos apresentam um PIB *per capita*, acima da região, com um crescimento de 63%, conforme análise dos últimos 7 anos.

A produção de grãos, leite e o setor metal-mecânico tem sido responsável pelo crescimento e desenvolvimento da área rural da região noroeste do RS. Nos últimos três anos a produção de soja obteve um crescimento de 46%, o milho 92% e o leite dobrou sua produção. O setor metal-mecânico apesar da oscilação de mercado tem contribuído com a renda do meio rural. Com incentivos das multinacionais, tais parceiras têm procurado se instalar próximas as montadoras, sendo estas áreas industriais pertencentes à área rural. Um exemplo deste incremento na renda da área rural é apresentado na seção 4.3.1 em que dos 6 (seis) municípios, 5 (cinco) evidenciam um crescente no consumo de energia elétrica da CERTHIL.

O setor leiteiro tem sido mais uma opção de melhorar a economia do homem do campo, pois para sua produção novas tecnologias têm sido difundidas e agregadas na área rural. Também propicia uma renda mensal e não só trimestral com soja, trigo, girassol, canola, milho entre outras produções de grãos.

Além dos setores de produção de grãos, leiteiro e metal mecânico, cabe ressaltar os esforços proferidos ao setor de transportes. Recentemente foi inaugurada a reativação da linha férrea, sendo mais uma alternativa de escoamento de grãos, implementos agrícolas entre outros produtos ao Porto de Rio Grande e demais regiões.

#### 4.3.1 Perspectivas de mudanças nos seis municípios em estudo

Os municípios da região apresentam perspectivas de crescimento econômico e investimentos no setor energético. Conforme entrevista com o responsável técnico da cooperativa em estudo, ficou visível a preocupação da cooperativa em investir em novas formas de geração energética para este e o próximo ano nas subestações conforme segue:

- *Subestação de Km 13*: esta subestação situa-se no interior do município de Três de Maio, e segundo o técnico a região está investindo anualmente no setor leiteiro. Mas, o setor de grãos também apresentou crescimento, no início de 2011. A cooperativa fez novos ligamentos em duas empresas comerciais de recebimento de grãos.

- *Subestação de Independência*: subestação localizada no município de Independência apresentou um aumento no consumo de energia no início deste ano em virtude do ligamento de uma empresa de recebimento de grãos, além do aumento do setor leiteiro e três novos pivôs de irrigação em lavouras. Para o final deste ano e início do ano de 2012 há previsão de ligações de uma área rural próxima a cidade.

- *Três Pedras*: no município de Novo Machado, atualmente não foram previstas alterações. Não se tem previsão de novos ligamentos e investimentos nesta região.

- *Pedro Lazaretti*: pertencente ao município de Tuparendi. A previsão de aumento nesta subestação será em virtude do crescente investimento do setor leiteiro.

- *Esquina Grápia*: subestação do município de Doutor Maurício Cardoso. Faz parte de uma região de divisa com o a Argentina e por ser banhado pelo rio Uruguai têm muitos balneários. Segundo o técnico, esta região está alterando o perfil de moradores sazonais (época de veraneio) para moradores fixos, além do pleno desenvolvimento do setor leiteiro.

- *Lajeado Patos*: subestação pertencente ao município de Horizontina. Apresenta uma crescente expansão da área urbana com dois novos loteamentos, duas novas empresas de laticínios e uma empresa de logística terceirizada da montadora agrícola John Deere.

Fica evidente que cada subestação merece estudo individualizado respeitando as situações e variáveis que possam contribuir para o aumento de energia elétrica, portanto, é necessário frisar a importância da empresa dispor de uma ferramenta que lhe auxilie em futuros investimentos no ramo energético para atender estes municípios.

Na seção 4.4 será abordado o funcionamento do modelo de pesquisa operacional elaborado como uma ferramenta de trabalho auxiliar a cooperativa em questão, na distribuição de painéis solares de acordo com as necessidades de cada subestação.

#### **4.4 Desenvolvimento de modelos de otimização de redes de distribuição e suprimento do consumo de energia**

##### 4.4.1 Alternativas de suprimento de energia

Conforme frisado anteriormente, a cooperativa em estudo hoje gera 1/3 (um terço) do que ela necessita para atender seus usuários. Impedida de expandir na geração hídrica com um Projeto de Usina II embargada por órgãos ambientais no Rio Buricá no município vizinho de Boa Vista do Buricá, busca por novas alternativas de suprimento de energia e uma delas é estudar a possibilidade de implantação de placas fotovoltaicas a rede elétrica. A energia fotovoltaica é flexível quanto ao local de geração energética, pois a cooperativa pode fazê-la de acordo com sua disponibilidade financeira além de permitir ser no local onde está tendo maior consumo.

A cooperativa no balanço de 2010 apresentou uma extensão de 2.737 km de rede e investiu em média, R\$ 3 a 4 milhões em redes e geração energética. Os estudos de previsão de médio e longo prazo e análise de cenários do desenvolvimento regional, apontam para uma perspectiva de aumento no consumo que faz com que a cooperativa venha a investir para ser mais competitiva.

Os valores obtidos nas previsões de 2011 a 2015 nos modelos SARIMA (1, 1, 1) (0, 1, 1)<sub>12</sub> encontram-se na Tabela 09, em que se estima para os próximos 5 anos uma produção de no mínimo 1292 kW, isso se ela quiser permanecer comprando o mesmo valor em kW da Rio Grande Energia (RGE), ou seja 67%, que adquire hoje. Se quiser ampliar sua produção própria, outras alternativas de suprimento de energia devem ser estudadas.

Tabela 09 - Perspectiva de consumo em kW das subestações da cooperativa nos próximos 5 anos.

Subest./Anos	2011	2012	2013	2014	2015	Total Kw
Km13	100	91	81	81	81	435
Independência	78	97	91	91	91	449
Três Pedras	-6	14	20	20	20	67
Pedro Lazaretti	16	30	29	29	29	132
Esquina Grápia	5	6	6	6	6	30
Lajeado Patos	40	40	34	34	34	181
<b>Total kW</b>	<b>233</b>	<b>277</b>	<b>261</b>	<b>261</b>	<b>261</b>	<b>1292</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Os valores totais dos 5 anos de cada subestação foram utilizados para simulação e aplicação dos modelos desenvolvidos em PO conforme pode ser observado na seção 4.4.2.

#### 4.4.2 Obtenção dos valores utilizados nos cálculos de otimização

Os valores utilizados em cada variável do modelo de PLI são dados reais da cooperativa, de empresas do ramo de equipamentos (usinas fotovoltaicas) e valores de previsões obtidos na aplicação dos modelos de séries temporais.

De acordo com o balanço da cooperativa a empresa dispõe de 3 a 4 milhões para investir em geração fotovoltaica por ano, visto que o estudo aqui proposto refere-se ao consumo energético de 5 anos. Portanto a cooperativa tem entre 15 e 20 milhões para investir.

O desembolso necessário na geração fotovoltaica é referente ao consumo de cinco anos a frente conforme a previsão de 1292 kW. Sabe-se que uma placa de 2m<sup>2</sup> gera 200 watts e que custa em torno de R\$ 1.248,00, portanto o custo para gerar 1 kW = R\$ 6.240,00. Quanto ao custo de inversores, estes variam de acordo com a potência que for desejada. Atualmente pesquisas de preços demonstraram que um inversor de 1 watt custa 1,70 euro, ou seja R\$ 3,79/Watts (1,70\*2,23), então 1 kW/h custa R\$ 3.791,00.

Com os estudos desenvolvidos nesta dissertação, o desembolso total da cooperativa para suprir o possível aumento no consumo energético dos próximos cinco anos de 1292 kW mantendo a compra de 67% da RGE é de aproximadamente R\$ 17.170.000,00. Na Tabela 10 observa-se o desembolso de cada subestação e dos três primeiro ramais de cada uma delas.

Tabela 10 – Desembolso proposto para gerar kW previsto.

<b>Subestações</b>	<b>kW a ser gerado</b>	<b>Desembolso Subestação</b>	<b>Desembolso Ramal 1</b>	<b>Desembolso Ramal 2</b>	<b>Desembolso Ramal 3</b>
Km 13	435	4.364.287,37	25.236,23	30.509,31	22.842,91
Indep.	449	5.346.142,52	15.250,16	34.946,28	40.69,14
3 Pedras	67	1.395.408,40	9.799,18	19.916,11	9.459,41
Pedro Laz.	132	2.189.869,32	33.849,36	32.362,46	17.885,07
Esq. Grápia	30	139.899,64	27.137,09	52.646,11	91.660,23
Laj. Patos	181	3.733.542,96	22.570,48	31.618,12	20.209,02

Fonte: Dados da pesquisa.

Os desembolsos dos 572 ramais de acordo com cada uma de suas subestações, assim como a ferramenta de otimização, encontram-se no CD em anexo.

#### 4.4.3 Elaboração da ferramenta hierarquizada de simulação

A elaboração da ferramenta foi com o intuito de minimizar os custos de investimentos em linhas nas subestações e nos ramais, bem como o custo de geração nas subestações e ramais, por meio de uma análise hierarquizada que contempla as opções de simulação: - investir numa única usina solar que atenda todas as subestações e seus ramais; - investir numa subestação ou nos seus ramais, quais (se em todos ou em alguns); - investir em ramais e quais (se em todos ou em alguns); - investir nos ramais e/ou continuar comprando da RGE. Sua construção é baseada nas situações reais da cooperativa de eletrificação rural. Na Figura 31 apresenta-se a ferramenta hierarquizada para as seis subestações e a possibilidade de construir uma única usina solar na cooperativa estudada. Reforça-se que é uma ferramenta hierarquizada de simulação em que a empresa poderá utilizar como forma de auxiliar no seu planejamento estratégico na alocação de seus recursos, tanto de curto, médio e longo prazo.



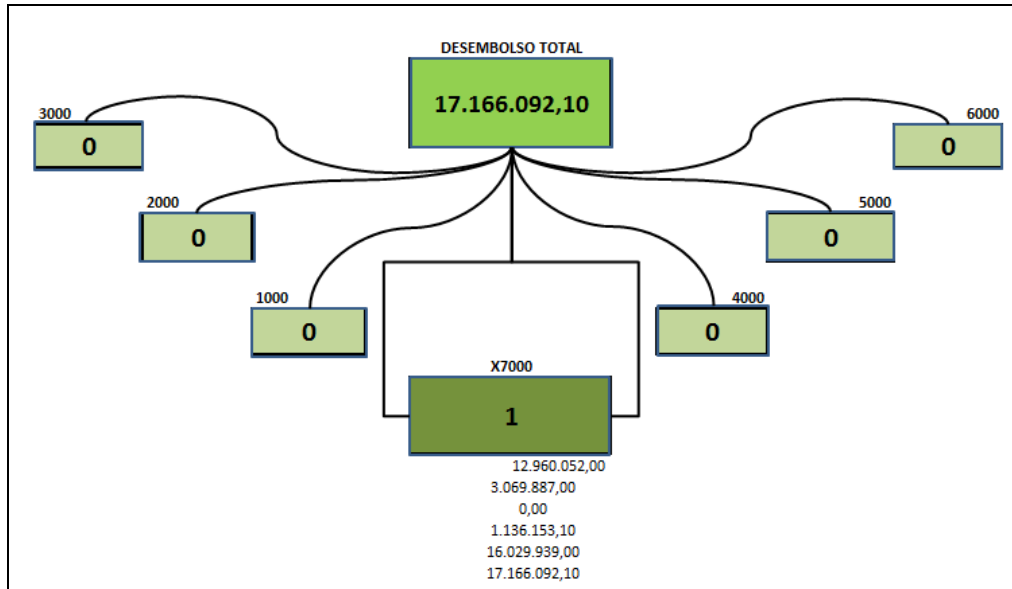


Figura 31 - Ferramenta hierarquizada de simulação em investimentos de geração elétrica fotovoltaica.

Fonte: Elaborado pela autora.

Desta forma a cooperativa, juntamente com seus associados, pode simular as possibilidades de investimento na geração fotovoltaica e organizar em seu planejamento estratégico suas formas de investimentos.

Após a simulação com a ferramenta, rodou-se o solver em que foi possível identificar qual solução viável de investimento o mesmo propôs para determinada subestação e ramais, conforme pode ser acompanhado na seção 4.4.4.

#### 4.4.4 Síntese de resultados obtidos no solver

As sugestões obtidas das seis subestações e a simulação para a construção de uma usina para suprir o aumento de consumo utilizando cálculos do solver por meio de um algoritmo de otimização pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de simulações de desembolsos nas subestações e ramais no solver.

SUBEST.	kW	INVESTIR	R\$	R\$	R\$	R\$ SOBRAS
			DISPONÍVEL	DESEMB.	FALTA	
<b>i1000</b>	435	X <sub>i</sub>	6.733.746,13	5.487.763,42	-	1.245.982,71
<b>i2000</b>	449	X <sub>i</sub>	6.950.446,40	5.599.168,47	-	1.351.295,93
<b>i3000</b>	67	Investir em 75 dos 83 X <sub>ij</sub>	1.037.151,70	1.170.406,26	-133.254,55	-
		X <sub>i</sub>	2.283.134,41	1.419.485,53	-	863.648,88
Primeiramente faltou recursos, portanto, foi acrescentado as sobras da subestação de Km13.						
<b>i4000</b>	132	Investir em 79 dos 80 X <sub>ij</sub>	2.043.343,65	2.312.645,38	-269.301,73	-
		X <sub>i</sub>	2.283.134,41	1.419.485,53	-	594.347,15
		Foram acrescentados as sobras de Três Pedras				
<b>i5000</b>	30	X <sub>i</sub>	414.909,95	464.396,28	-	49.486,33
<b>i6000</b>	181	X <sub>i</sub>	2.801.857,59	1.892.050,01	-	909.807,58
<b>Usina geral</b> <b>i7000</b>	1292	X <sub>i</sub>	20.000.000,00	17.166.092,11	-	2.833.907,89

Fonte: Dados da pesquisa.

Nas subestações  $i_{1000}$  (Km 13),  $i_{2000}$  (Independência),  $i_{5000}$  (Esquina Grápia) e  $i_{6000}$  (Lajeado Patos) a sugestão foi de construir uma usina fotovoltaica na própria subestação, pois a mesma tinha recursos suficientes para gerar os kW previstos. Já para as subestações de  $i_{3000}$  (Três Pedras) e  $i_{4000}$  (Pedro Lazaretti) o solver apresentou alguns pontos ótimos de investimento visto que as mesmas não dispunham de recursos suficientes para os kW previstos. Mas como houve sobras das subestações de km13 e Independência, os recursos destas foram acrescentados nas de Três Pedras e Pedro Lazaretti, e na segunda simulação havia recursos suficientes em que o solver sugeriu construir na própria subestação uma usina fotovoltaica.

Estas são algumas opções que podem vir a ocorrer possibilitando a Cooperativa simular várias vezes, obtendo muitas situações que permitam ter uma visão de forma estratificada para futuras alternativas de investimento como aumentar sua geração própria de eletricidade utilizando painéis fotovoltaicos.

A proposta deste trabalho não é mostrar a cooperativa que caminho seguir, mas sim, com as ferramentas elaboradas, auxiliá-la em suas decisões.

Cálculos completos, como pontos ótimos de investimentos calculados no aplicativo Solver do Excel, assim como a ferramenta de simulação encontram-se no CD em anexo.

## 5 CONCLUSÃO

As decisões estratégicas relacionadas aos investimentos numa cooperativa que gera e distribui energia elétrica, quando associadas à necessidade de atender restrições de capacidade financeira, aliada ao grande número de variáveis de comportamento futuro incerto e errático é tarefa complexa. No presente caso, o número excedeu a 500 variáveis, cada uma delas com um comportamento que poderia ser previsível a partir de dados passados, mas, sujeitas a influências humanas e políticas de desenvolvimento local e regional.

Esta complexidade de variáveis inviabiliza a elaboração simultânea de modelos que possam revelar o seu comportamento e possibilitem avaliar a sua conduta futura. Por esta razão, utilizou-se um algoritmo que foi útil às tomadas de decisões de forma hierarquizada possibilitando a análise desde a usina geradora, suas subestações e seus respectivos ramais.

Tradicionalmente, a visão que as cooperativas de geração de energia possuem para obterem um incremento na sua capacidade de geração elétrica, foca exclusivamente na construção de pequenas centrais hidrelétricas, envolvendo um alto investimento e baixo custo de operação. Logo se buscou uma forma de estudar a geração de energia com a utilização de energias renováveis e de baixo impacto ambiental.

Pois se observou ao longo deste estudo o esgotamento previsível dos locais de potencial hídrico, das fontes de combustíveis fósseis, assim como o abandono da possibilidade de geração por meio da energia nuclear. Estas formas de geração apresentam a necessidade de seleção de locais favoráveis e investimentos elevados. A geração eólica e solar, são flexíveis quanto à localização e aos investimentos necessários, mas esbarra ainda, na necessidade de minimizar seus custos de instalação e distribuição.

Cabe a Engenharia de Produção dentre suas áreas de atuação como a pesquisa operacional propor soluções criativas, na resolução desse problema enfrentado pelas cooperativas. Isto é, aproximar ao máximo o custo de geração e distribuição da energia fotovoltaica àqueles da fonte de geração da energia hídrica.

Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi alcançado com a proposição de um conjunto de ferramentas que envolveu métodos de previsão e de otimização, aplicados a um caso real de uma cooperativa de Eletrificação Rural do Noroeste Gaúcho, que pode auxiliar a cooperativa em seu planejamento estratégico de investimentos frente a cenários erráticos e aperiódicos futuros.

Da análise realizada com os modelos de previsão foi possível identificar o processo gerador das séries de energia elétrica das subestações, onde os modelos encontrados foram os da classe geral SARIMA, os quais apresentaram as características de *ruído branco* e estatísticas de validação que os tornaram aptos para serem utilizados para prever os períodos de 2011 a 2015 do consumo energético das subestações da cooperativa. Estes valores previstos foram utilizados para compor a ferramenta de simulação por meio da programação linear inteira.

Foi realizada uma análise qualitativa de cenários de desenvolvimento dos municípios atendidos pela cooperativa. Para tal, foi aplicada a metodologia de Kohler em que analisa o comportamento dos municípios que contemplam as seis subestações em relação à região e ao estado, quanto ao desenvolvimento econômico e possíveis perspectivas de aumento no consumo energético. Foi possível observar que os modelos SARIMA foram capazes de captar a sazonalidade do consumo em relação ao tipo de atividade econômica desenvolvida na região, esta constatação foi corroborada pelos especialistas *ad hoc* e pelos dados governamentais, que mostram os períodos de aumento e diminuição de consumo de energia, assim como um aumento geral na produção da região.

Por meio do conjunto de ferramentas utilizadas para auxiliar na tomada de decisão relacionada aos investimentos a serem aplicados na geração de novas fontes de energia foi desenvolvido um algoritmo, o qual foi implementado em uma planilha eletrônica de modo à auxiliar na atribuição dos valores de desembolsos necessários para suprir o consumo previstos, para otimizar o emprego dos recursos nas seis subestações e nos 572 ramais.

Os modelos e algoritmos apresentados pela literatura consideram as linhas de transmissão e distribuição aliadas a locais fixos de geração. A novidade trazida pela energia solar é sua flexibilidade quanto à capacidade e localização. Mais ainda, numa cooperativa de eletrificação rural, os cooperados são ao mesmo tempo quotistas, com interesses econômicos de proprietários e consumidores com interesses de clientes. Assim, as funções objetivo dos modelos de programação linear inteira, desenvolvidos até o momento, apresentam uma visão limitada à minimização de custos.

Ampliados os interesses e as possibilidades, cabe como sugestão dar continuidade aos estudos e construir uma função utilidade para melhor representar os novos interesses e as novas possibilidades da cooperativa.

## REFERÊNCIAS

ABRAHAM, B.; LEDOLTER, J. *Statistica methods for forecasting*. New Your: John Wiley & Sons, 1983. 445p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa “LUZ PARA TODOS”**. **Portaria N° 447, de 31 de dezembro de 2004**. Brasília, 2004. Disponível em:< <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bprt2004447mme.pdf> >. Acesso 20 jan. 2011.

ANDRADE, E. L. **Introdução a Pesquisa Operacional: métodos e modelos para análise de decisão**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 190 f.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Campus, 2007. 523p.

ARSEGO, D. A.; BERTAGNOLLI, R. F.; PEREIRA, E. B.; SCHUCH, N. J. **Avaliação do potencial eólico no Sul do Brasil: relatório final de projeto de iniciação científica PIBIC/INPE – CNPQ/MCT**. Santa Maria, 2007.

BEM, A. B. **A utilização da regressão dinâmica para prever a demanda por matrícula no ensino fundamental em Santa Catarina**. 1998. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

BOX, G. E. P. e LUCEÑO, A. Discrete proportional-integral adjustment and statistical process control. **Journal of Quality Technology**. v.29, n. 3, 1997.

BOX, G. E. P., JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. 3 ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994. 592 p.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis forecasting and control**. Edição revisada. San Francisco: HoldenDay, 1976. 575 p.

BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. **Time series analysis: forecasting and control**. San Francisco: Holden-Day, 1970. 553p.

BOX, G.E.P.; PIERCE, D.A. *Distribution of autocorrelations in autoregressive moving average models*. **Journal of the American Statistical Association**, v. 65, p. 1509 – 1526, 1970.

BRUM, A. J. **Desenvolvimento Econômico Brasileiro**, 27ª Edição. Ijuí: Unijuí, p.571, 2010.

BÜTTENBENDER, P. L. O Cooperativismo Regional: Estudo sobre as contribuições das cooperativas e associações no desenvolvimento da Região do Grande Santa Rosa. In: **Perspectiva Econômica**, São Leopoldo, Cedope/Unisinus, v. 29, n. 86, 1995.

BÜTTENBENDER, P. L.; MANTOVANI, C. A.; GIRARDI, D. G.; TURRA, D. E. R. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Região Fronteira Noroeste 2010 – 2030: Desenvolver é planejar o futuro**. COREDE FRONTEIRA NOROESTE, Três de Maio, 2010.

CAI, X.; Mc KINNEY, D. C.; LASDON, L. S.; WATKINS JÚNIOR, D. W. Solving large non-convex water resources management models using generalized benders decomposition. **Operations Research**. v.49. n. 2, p. 235-245, 2001.

CAIXETA FILHO, J. V. **Pesquisa Operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. São Paulo: Atlas S.A, 2004. 169 f.

CAMPOS, R.J. **Previsão de séries temporais com aplicações a séries de consumo de energia elétrica**. 2008. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CAPELETTO, G.J.; MOURA, G.H.Z. **Balanco energético do Rio Grande do Sul 2010: ano base 2009**. Porto Alegre, Grupo CEEE / Secretaria de Infra-Estrutura e Logística do Rio Grande do Sul, 2010. 240p. ; il. Disponível em:<<http://www.ceee.com.br/ceee/balanco2010/Balanco-Energetico-2010-anobase-2009.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2011.

CARDOSO, M. M. **Simulação De Modelos Garch para Séries Temporais Univariadas de demanda de Energia Elétrica para Consumidores Livres em Regime de Curto Prazo**. 2005.175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

CERTHIL. **CERTHIL 40 anos: você faz parte desta história**. Três de Maio: SR Gráfica, 2009. 86p.

CIRILLO, M. A. e FERREIRA, D. F. Extensão do teste para normalidade univariado baseado no coeficiente de correlação quantil-quantil para o caso multivariado. **Matemática e Estatística**. v.21, n.3 p. 67 – 84, 2003.

COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL ENTRE RIOS LTDA. **Cooperativas receberam da governadora Yeda recursos para eletrificação rural**. Três de Maio, 2009. Disponível em: <<http://www.certhil.com.br/>>. Acesso em: 02 jan. 2011.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em:<<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/>>. Acesso em 28 de junho de 2011.

CRAMER, G. [Entrevista disponibilizada em 1 de novembro de 2010, a internet]. 2010. Disponível em: <[http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/study--pv-expansion-wont-affect-germanys-power-grids\\_100001475/](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/study--pv-expansion-wont-affect-germanys-power-grids_100001475/)>. Acesso em: 23 de jul. 2011.

DALLABRIDA, V. R. e BECKER, D. F. **Dinâmicas territoriais do desenvolvimento**. Santa Cruz do Sul: Edunisc, 2003.

DALLABRIDA, V. R; BÜTTENBENDER, P. L. **Gestão, Inovação e Desenvolvimento: oportunidades e desafios para o desenvolvimento da região fronteira noroeste**. Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 2007. 407p.

DALLABRIDA, V. R; BÜTTENBENDER, P. L. **Planejamento Estratégico Territorial: a experiência de planejamento do desenvolvimento na região Fronteira Noroeste – RS - Brasil**. Ijuí: UNIJUÍ, 2006. 160p.

DAMM, S.P. **Construto Histórico e socioeconômico da cooperativa de energia e desenvolvimento rural entre rio Ltda – CERTHIL**. 2007. 97f. Monografia (Especialização em Gestão Cooperativa) – Sociedade Educacional Três de Maio – SETREM, Três de Maio, 2007.

DANTZIG, G. B.; THAPA, M. N. **Springer Series in Operations Research: Linear Programming**. New York: Springer, 1997. 435p.

DAVID, W.; WATKINS JUNIOR; MCKINNEY, D.C.; LASDON, L. S.; NIELSEN, S. S.; MARTIN, Q. W. A scenario-based stochastic programming model from water supplies from the highland lakes. **Elsevier Science**. v.7, p. 211-230, 2000.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N.; CHASE, R. B. **Fundamentos da administração da produção**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2001.598 p.

DIAS B. H.;MARCATO, A. L. M.; SOUZA, R. C.; SOARES, M. P. Programação dinâmica estocástica aplicada ao planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro através do uso de processamento paralelo. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 30/08 a 03/09., Bento Gonçalves, 2010. **Anais...** Bento Gonçalves: XLII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010.

DIAS, E. D. M. **Previsão de médio prazo do consumo de energia elétrica no Brasil: estimação via metodologia Box & Jenkins e regressão dinâmica**. 2008. 303 f. Dissertação (Mestre em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia e Administração da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

DIAS, R. S. **Metodologia de Previsão de Carga de Longo Prazo de Energia Elétrica**. 2010. 70f. Monografia (Grau em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2010.

DICKEY, D.A.; FULLER, W.A. “Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root”. **Journal of the American Statistical Association**, n. 74, p. 427-431, 1979.

DUARTE, H. N. M. **Utilização da energia eólica em sistemas híbridos de geração de energia visando pequenas comunidades**. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ENDERS, W. **Applied econometric time series**. New York: John Wiley, 1995. 433 p.

ERDMANN, R. H.; LANDMANN, R. Uma abordagem heurística para a programação da produção na indústria de fundição com utilização da lógica fuzzy. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 1, p. 119-130, 2011.

EUROPEAN UNION. **A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology. The European Photovoltaic Technology Platform**. Luxembourg, 2007. Disponível em: < <http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf> >. Acesso em: 08 de fev. 2010.

FACHINELLO, A. L.; BACCHI, M. R. P. Determinação de um modelo de previsão univariado para preços de leite pagos aos produtores em Santa Catarina. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, ano 24, n. 46, p. 47-62, 2006.

FAGONDE, F. EMATER Santa Rosa. **Produção de Grãos e leite nos últimos três anos na região noroeste do RS** [mensagem pessoal]. Contato por email: < flavfago@emater.tche.br > em 12 de abr. 2011.

FEE - Fundação de Economia e Estatística. **PIB Municipal da fronteira noroeste do RS**. Disponível em: < [http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg\\_pib\\_municipal\\_sh\\_pib\\_nova.php?serie=1999-2008](http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg_pib_municipal_sh_pib_nova.php?serie=1999-2008)>. Acesso em: 27 de maio de 2011.

FEE - Fundação de Economia e Estatística. **PIB per capita da fronteira noroeste do RS**. Disponível em: < [http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg\\_pib\\_municipal\\_sh\\_pib\\_nova.php?serie=1999-2008](http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg_pib_municipal_sh_pib_nova.php?serie=1999-2008)>. Acesso em: 27 de maio de 2011.

FEE - Fundação de Economia e Estatística. **População por município, situação de domicílio e sexo, 2010 – Rio Grande do Sul**. Disponível em: <[http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg\\_populacao.php](http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/estatisticas/pg_populacao.php)>. Acesso em: 27 de maio de 2011.

FEI S. P. **Proposição automática de reforços em redes de distribuição de energia elétrica utilizando programação linear e algoritmo Genético**. 2006. 80f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

FILDES, R.; STEKLER, H. The state of macroeconomic forecasting. **Journal of Macroeconomics**, v. 24, p. 435–468, 2002.

GALVÃO, P. J. L. M. **Análise envoltória de dados aplicada ao setor brasileiro de distribuição de energia elétrica**. 2008. 109f. Dissertação (Mestre em Administração) – Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2008.

GARDNER Jr., E. S. Exponential smoothing: the state of the art – part II. **International Journal of Forecasting**, v. 22, p. 637-666, 2006.

GARVIN, D. A; LEVESQUE, L. C. **A Note on Scenario Planning**. *Harvard Business School*, v. 9, p. 306 – 003, 2006.



GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2005. 518p.

GOOIJER, J. G., HYNDMAN, R.J, 25 Years of Time Series Forecasting. **International Journal of Forecasting**, v. 22, p. 443-473, 2006.

GRANVILLE, S.; OLIVEIRA, G. C.; THOMÉ, L. M.; CAMPODÓMICO, N.; LATORRE, M. L.; PEREIRA, M. V. F.; BARROSO, L. A. **Stochastic Optimization of Transmission Constrained and Large Scale Hydrothermal Systems in a Competitive Framework**. 2004. Disponível em: < [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1270469](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1270469)>. Acesso em: 10 de jul. 2011.

GUEDES FILHO, E. M.; CAMARGO, J. M. **Setor Elétrico Brasileiro: cenários de crescimento e requisitos para a retomada de investimentos**. Tendências e Consultoria Integrada, p. 204, 2003. Tirado de um relatório.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**, Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. 812 p.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**, São Paulo: Makron Books, 2000. 846 p.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. Arizona: Mc Graw Hill, 2001. 1214p.

HYNDMAN, R. J. *Forecasting based on state space models for exponential smoothing*. 2002. Disponível em: < <http://www.diku.dk/hjemmesider/ansatte/pisinger/production/ForecastingBasedOnStateSpaceModelsForExponentialSmoothing.pdf> >. Acesso em: Nov. 2010.

HYNDMAN, R.; KOEHLER, A. Another Look at Measures of Forecast Accuracy. **International Journal of Forecasting**, n. 22: p. 679-688, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK. **Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting**. Washington, jul, 2010. Disponível em:< [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2010).pdf) >. Acesso em 04 de jan. 2011.

INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK. **Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting**. Washington, mai, 2009. Disponível em:< [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2009\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2009).pdf) >. Acesso em: 04 de jan. 2011.

IRFFI, G.; CASTELAR, I.; SIQUEIRA, M.; LINHARES, F. Previsão da demanda por energia elétrica para classes de consumo na região Nordeste, usando OLS dinâmico e mudança de regime. **Economia Aplicada**, v.13, n.01: p. 69-98, 2009.

JANNUZZI, G.M.; VARELLA, F.K.O.M., GOMES, R.D.M. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas, out, 2009. Disponível em:< [http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO\\_PROJETO\\_2\\_FINAL.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf) >. Acesso em: 08 de fev. 2011.

JARQUE C.; BERA, M, Anil K. "*Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals*". **Economics Letters**, v. 6 n. 03:p. 255–259, 1980.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 328 p.

KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, H. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Blucher, 2009. 216 f.

KOHLER, R. Aspectos Socioeconômicos da Região Fronteira Noroeste. **UNIJUÍ**. p. 57 – 93, 2006.

LASDON, L. S. **Optimization theory for large systems**. New York: The Macmillan Company, 1970. 523 f.

LEÃO, R. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Elétrica. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Ceará, [38-]. Disponível em:< <http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/1Introducao.pdf> >. Acesso em 26 jan. 2011.

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. "On a Measure of a Lack of Fit in Time Series Models". *Biometrika*. n. 65, p. 297 – 303, 1978.

LORENSET, V. R. Analista de Logística da AGCO América do Sul. **Número de parceiras da AGCO na região noroeste do RS** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <Vilmarina.Rui@agcocorp.com\_> em 18 jul. 2011.

MACÊDO, W. N. **Análise do fator de dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos à Rede**. 2006. 201 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MACHADO, J. A. P. M. **Empresas Shneider Logemann: 50 Anos de História**. Ed. L&PM, p. 174, 1995.

MARCHEZAN, A.; SOUZA, A. M. Previsão dos preços dos principais grãos do Rio Grande do Sul. **Ciências Rurais Online**. ISSN 0103-8478, 2010.

MÉLLO JUNIOR, A. V. e MATOS, L. N. Otimização da operação de reservatório pela programação dinâmica em um processo de decisão markoviano. **RBRH**. v.4, n. 3, p. 5-15, 1999.

MENDÉZ, R. Innovación y desarrollo territorial: algunos debates teóricos recientes. **Revista Euro, Santiago de Chile**., v. 28, n. 84, p. 63-83, 2002.

MILÉSKI JUNIOR, A. **Análise de métodos de previsão de demanda baseados em séries temporais em uma empresa do setor de perfumes e cosméticos**. 2007. 117f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pontifícia Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Informativo LUZ PARA TODOS. Luz para Todos tira 13 milhões de brasileiros da escuridão.** Disponível em: <<http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Informativo%2025%20CDR.pdf>>. Acesso em: 24/01/2011. N° 027 – dez. 2010.

MONKS, J. G. **Administração da Produção.** São Paulo: Mc Graw-Hill, 1987. 502 p.

MONTICELLI, A. J. **Expansão de sistemas elétricos de potencia: um algoritmo para o planejamento do sistema de transmissão.** 1975. 95 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia: Faculdade Federal de Campinas, Campinas, 1975.

MORETTIN, P. A TOLOI, C. M. **Séries Temporais.** 2 ed. São Paulo: Atual, 1987. 135 p.

MORETTIN, P. A. **Econometria Financeira: Um curso em Séries Temporais Financeiras.** São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 319 p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais.** São Paulo: Edgar Blücher, 2004. 535 p.

MORETTIN,P. A.; TOLOI, C. M. C. Modelos para previsão de series temporais. Rio de Janeiro: IMPA, 1981. 538 p.

MORETTIN,P.A. **Econometria financeira: um curso em séries temporais financeiras.** São Paulo: ABE,2006. 564 p.

OLIVEIRA, M.E. **Avaliação de Metodologias de Cálculo de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 2009. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho”, Ilha da Solteira, 2009.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração distribuída de eletricidade; inserção de edificações fotovoltaicas conectadas a rede elétrica no estado de São Paulo.** 2002. 205f. Tese (Doutorado em energia) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2002.

PACHECO, R. F.; SILVA A. V. F. Aplicação de modelos quantitativos de previsão em uma empresa de transporte ferroviário. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21 a 24., Ouro Preto, 2003. **Anais...Ouro Preto: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de produção,** 2003.

PEREIRA, L. P.; REQUEIJO, J. G. **Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos.** Lisboa: Prefácio, 2008. 791 p.

PEREIRA, M. V. F. e PINTO, L. M. V. G. *Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning.* **Mathematical Programing.** v. 52, p. 359-375, 1991.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. *Econometria: modelos e previsões*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 726 p.

PIRES, J. C. L., GOSTKORZEWICZ, J. e GIAMBIAGI, F. **O cenário macroeconômico e as condições de oferta de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2001. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/td/Td-85.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/td/Td-85.pdf)>. Acesso em: 27 de abr. 2011.

PÖLTL, A. *Scheduling durch Heuristische Suche- das ISIS-System*. 2001. Disponível em: <<http://www.informatik.uni-ulm.de/ki/Edu/Seminare/Scheduling/WS0001/Isis-Ausarbeitung.pdf>>. Acesso em 02 mai. 2011.

PRADO, D. **Programação Linear**. Nova Lima: Indg TecS, 2004. 238p.

PROENÇA, E.D.R.B. **A energia solar fotovoltaica em Portugal - Estado-da-arte e perspectivas de desenvolvimento**. 2007. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia E Gestão Industrial) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

QUAGLIA, R.B. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: cenários para o setor elétrico brasileiro**. 2010. 115f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.

REIS, A. Energia solar no Brasil pode ser vantajosa a partir de 2013. In: *Inovação Tecnológica*, 2008. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-solar-no-brasil-pode-ser-vantajosa-a-partir-de-2013&id>>. Acesso em: 31 de jan. 2010.

REN 21. **Renewables 2010 Global Status Report** : Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris, set. 2010. Disponível em: <[http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21\\_GSR\\_2010\\_full\\_revised%20Sept2010.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf)>. Acesso em: 29 de jan. 2011.

RIBEIRO, L.C; PAULA, A. V. Previsão de população através de modelos ARIMA de Box e Jenkins, 2000 – In: *Encontro Nacional de Estudos Populacionais, Anais...*: Universidade Federal de Minas Gerais, Caxambu, 2000. Disponível em: <[http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/anais/pdf/2000/Todos/projt9\\_3.pdf](http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/anais/pdf/2000/Todos/projt9_3.pdf)>. Acesso em: 27 de jul de 2011.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I.; MONTENEGRO, A.; BRAUN, P.; DAVIENNE FILHO, R. Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 07 a 10., Fortaleza, 2008. **Anais...Fortaleza: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2008.

SÁFADI, T. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de furnas. **Ciência e Agrotecnologia**. V 28, n.1 p.142-148, 2004.

SALAMONI, I.T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica.** 2009. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SILVA JUNIOR, I. C.; OLIVEIRO, E. J; PEREIRA, J. L.R.; GARGIA, P. A. N. Planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão utilizando um novo algoritmo heurístico construtivo. 2003. Disponível em: <<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/GTSP%20B-056.pdf>>. Acesso em: 10 de jul. 2011.

SOUZA, G. P. **Previsão do consumo industrial de energia elétrica no estado de Santa Catarina: uma aplicação da combinação de previsões entre modelos univariados e de regressão dinâmica.** 2005. 145 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

STORCK, M. C. F. **Projeção mensal da demanda de energia utilizando VEC e estimativa Box – Jenkins para os parâmetros.** 2008. 91f. Dissertação (Mestre em Ciências Contábeis) - Fundação Capixaba de Pesquisas em Contabilidade, Economia e Finanças FUCAPE, Vitória, 2008.

TAGLIALENHA, S.L.S. **Novas Aplicações de Metaheurísticas na Solução do Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.** 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho”, Ilha da Solteira, 2008.

TAHA, H. A. *Operations Research an introduction.* New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 813p.

UFRGS. **Capacitação e atividades do laboratório de energia solar.** Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/andamento.htm>>. Acesso em: 18 de mar. 2011.

VASCONCELLOS, M. A. S.; ALVES, D. **Manual de Econometria.** São Paulo: Atlas, 2000. 308 p.

VECCHI, T. P. B. **Um estudo de modelos matemáticos para expansão de redes de distribuição de energia elétrica.** 2004. 144f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, 2004.

WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D. Previsão de demanda: Aplicação uma aplicação dos modelos Box-Jenkins na área de assistência técnica de computadores pessoais. **Gestão & Produção**, v.10, n.1, p.47-67, 2003.

WILK, B. M. M. e GNANADESIKAN, R. Probability plotting methods for the analysis of data. **Biometrika**, v. 55, n. 1, p.1-17, 1968.

WILLERS, C. E. **CERTHIL: Sustentabilidade ambiental em uma Usina Hidrelétrica de Pequeno Porte (PCH)**. Santa Rosa, 2010. Disponível em: < <http://tead.grupouninter.com.br/ac1/arquivos/b4ac536d65fa4ae63280135882fb286c.swf> >. Acesso em: 15 de outubro. 2011.

WORLD ENERGY OUTLOOK: WEO – 2010. new Electricity access Data Base (country-by-country). **Access to Electricity**. Disponível em: < <http://www.worldenergyoutlook.org/electricity.asp> >. Acesso em: 04 de jan. 2011.

ZILLES, R. **Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)**. Apresentação (Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – LSF) – Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: < <http://www.ufpa.br/inct-ereea/ZillesCYTED.pdf> >. Acesso em: 10 de fev. 2011.