ANDRÉ TAKESHI TAMASHIRO

**Riscos de Mercado na Comercialização de Energia: Uma
Abordagem via Complementação Energética e Gestão de Portfólio
de Projetos, considerando a mitigação de incertezas da Geração
Eólica**

São Paulo

2014

ANDRÉ TAKESHI TAMASHIRO

**Riscos de Mercado na Comercialização de Energia: Uma
Abordagem via Complementação Energética e Gestão de Portfólio
de Projetos, considerando a mitigação de incertezas da Geração
Eólica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

São Paulo

2014

ANDRÉ TAKESHI TAMASHIRO

**Riscos de Mercado na Comercialização de Energia: Uma
Abordagem via Complementação Energética e Gestão de Portfólio
de Projetos, considerando a mitigação de incertezas da Geração
Eólica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de julho de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Tamashiro, Andre Takeshi

Riscos de mercado na comercialização de energia: uma Abordagem via complementação energética e gestão de portfolio de projetos, considerando a mitigação de incertezas da geração eólica / A.T. Tamashiro. – versão corr. -- São Paulo, 2014.

105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Energia (Aspectos econômicos) 2.Energia eólica 3.Análise de risco I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

Ao meu querido pai
in memoriam

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dorel Soares Ramos pelo acolhimento e conselhos nos momentos críticos acadêmicos e profissionais sempre disposto a ajudar e novamente, não só academicamente, mas profissionalmente também. Seus ensinamentos e dedicação foram decisivos para a conclusão desta pesquisa.

A Professora Eliane Fadigas por acreditar durante a primeira parte do mestrado.

Aos “meninos” Ewerton Guarnier, Luiz Armando Steinle e Lucas Witzler pelas ricas discussões de situações “inviáveis” durante as inúmeras simulações.

Aos companheiros de todo dia Junior (FUSP), Leo (Pure), Neide (GEPEA), Gina (Pure) e Cris (Pure) pela convivência e pela ajuda para lidar com o “mundo USP”.

Aos colegas João Calisto, Vitor Lazzareschi, Dejair Domingues pelo incentivo e confiança demonstradas.

Aos tantos colegas da CCEE que não poderia deixar de mencionar aqui pelos quase 10 anos de convívio e que muitos se tornaram amigos.

Aos amigos de mais de duas décadas Eduardo Rubio, Adilson Santana (Abu) e Mauricio Fava pelo apoio aos momentos difíceis sempre me descontraindo e me motivando.

À minha querida companheira Geovana (vou repetir o mesmo de sua tese), que chegou na “finaleira” desta jornada trazendo a paz, a harmonia e o discernimento tão necessários a este momento.

A minha família pela vida sem a qual não estaria aqui onde cheguei.

O pessimista se queixa do vento,
o otimista espera que ele mude
e o realista ajusta as velas.

William George Ward

RESUMO

No Setor Elétrico Brasileiro as fontes renováveis de energia têm se tornadas atrativas do ponto de vista do investidor devido não só aos incentivos de política de governo, como também por exibirem uma elevada competitividade, além da sinergia proveniente da complementariedade energética entre essas fontes. Por outro lado, a tomada de decisão de investimento em empreendimentos de geração tem se caracterizado cada vez mais como um processo complexo e arriscado, devido à potencial perda financeira decorrente de um fluxo de caixa bastante irregular, fundamentalmente em função da interação no mercado de curto prazo. Este trabalho descreve o problema e a solução para um investidor caracterizado por sua aversão ou “apetite” ao risco otimizando os recursos com restrição de risco (VaR, CVaR mesclado com conceito do CFaR). Os resultados mostram que para parâmetros usuais que condicionam o risco financeiro, tais como, (i) a taxa de investimento, (ii) preço de contrato de venda e (iii) custo de investimento, o modelo busca a solução para a melhor alocação de investimento, representada por um portfólio ótimo de projetos, respeitando limites fixados para o montante a ser investido e o risco financeiro correspondente. De forma geral, a conceituação da medida de aversão a risco e sua implementação no modelo de otimização desenvolvido permitiram obter resultados robustos para o tipo de problema abordado e a diversidade de situações analisada a partir de “Estudos de Caso”.

Palavras-Chave: Comercialização de Energia, Seleção de Portfólios, Algoritmo Genético, Otimização, Value-at-Risk e Conditional-Value-at-Risk.

ABSTRACT

Brazilian Electricity Sector in renewable energy sources has become attractive from the investor point of view not only because of government policy incentives, but also to exhibit a high competitiveness beyond energy synergy from the complementarity between energy sources. However, the decision making of investments in generation capacity has come to characterize a complex and risky process, because of the potential financial loss resulting from a highly irregular cash flow, mainly due to the interaction in the short-term market. This paper describes the problem and solution for the risk averse investor optimizing financial resources constrained risk (VaR, CVaR merged with the concept CFaR). The results show that for the risk factors, as for instance, investment rate, sales price and cost of investment contract, the model responds within the limits of tax risks. In general, the concept of measure of risk aversion and its implementation in the optimization model developed is shown robust to the type of problem addressed.

Keywords: Energy Trading, Portfolio Selection, Genetic Algorithm, Optimization, Value-at-Risk and Conditional-Value-at-Risk.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Conceito De Risco E Sua Importância Para As Empresas (Financeiras Ou Não) 20	
2.2	Mensuração dos riscos incorridos em mercado para empresas NÃO FINANCEIRAS.....	23
2.3	Cash Flow-at-Risk.....	25
2.4	CFAR e o Cash Management	26
2.5	Mapeamento e Cálculo do CFaR	27
2.6	Uso do CFaR Para Fins De Hedge	27
2.7	Complementariedade Sazonal Para O Regime Hidrológico.....	29
3	MODELO DA RECEITA	33
3.1	Modelo Da Receita Total Anual.....	33
3.2	Modelo da Receita da Líquida (Ou Valor Presente Líquido por série)	37
4	FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO EM FONTES RENOVÁVEIS COM GESTÃO DO PORTFÓLIO SOB RESTRIÇÃO DE RISCO.....	40
4.1	Formulação do Problema de Investimento em Fontes Renováveis	40
4.2	Solução do Problema de Investimento em Fontes Renováveis e Gestão do Portfólio sob Restrição de Risco [17].....	44
4.2.1	A Estrutura de um Algoritmo Evolutivo	44
4.2.2	Algoritmo Genético	46
5	APLICAÇÃO DA MODELAGEM DESENVOLVIDA PARA A ANÁLISE DE PORTFÓLIO DE FONTES RENOVÁVEIS.....	61
5.1	Descrição dos Casos Simulados – Contratação ótima	61
5.2	ANÁLISE DE CONTRATAÇÃO ÓTIMA PARA UM PORTFÓLIO PRÉ-DETERMINADO	63
5.2.1	Estudo de Caso 1 – PROINFA Nordeste 2009 e 2010	63
5.2.2	Estudo de Caso 2 – PROINFA Nordeste 2009 e 2010 - Preço de Venda 67	
5.2.3	Estudo de Caso 3– PROINFA Nordeste 2011 e 2013	70

5.2.4	Estudo de Caso 4 – PROINFA Nordeste 2011 e 2013 - Preço de Venda	73
5.2.5	Estudo de Caso 5 – PROINFA Nordeste 2013.....	76
5.2.6	Estudo de Caso 6 – LEILÃO Nordeste 2013	77
5.3	FORMAÇÃO DE PORTFÓLIO ÓTIMO DE RENOVÁVEIS COM RESTRIÇÕES DE RISCO DE MERCADO E TETO DE INVESTIMENTO	82
5.4	Descrição dos Casos Simulados – Portfólio ótimo.....	82
5.4.1	Estudo de Caso 7 – CASO BASE.....	84
5.4.2	Estudo de Caso 8 – EÓLICA MAIS EM CONTA.....	88
5.4.3	Estudo de Caso 9 – L.E.N. A-3 E L.E.R. DE 2013.....	91
5.4.4	Estudo de Caso 10 – PERFORMANCE DO A.G.....	94
6	CONCLUSÃO	97

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desta pesquisa é quantificar a complementação energética existente entre um parque eólico e outras fontes renováveis como a PCH e biomassa, quando considerados em portfólio, como meio de mitigação de risco na comercialização, ponderando a sinergia energética entre fontes distintas para definir a alocação ótima de um montante pré fixado de capital para investimento, de modo a compor um portfólio de ativos que garantam o máximo retorno financeiro, para um determinado nível de risco adotado como restrição e condicionador de decisão. Para tanto, é utilizado um modelo, já desenvolvido, que busca valores ótimos para compor um portfólio de fontes renováveis, respeitando um teto orçamentário. No modelo computacional desenvolvido, implementou-se a técnica de algoritmos genéticos, que permite encontrar uma solução otimizada, para o problema de investimento descrito, de forma relativamente eficiente e robusta, considerando adequadamente o perfil de pré disposição ao risco do investidor.

Uma vertente de investigação desta pesquisa, que convém destacar, centra-se no conceito de complementação energética de fontes renováveis. Como o risco é inerente ao negócio em qualquer tipo de mercado e, portanto, não é exclusivo ao mercado de energia elétrica, o conceito aqui adotado sobre a diversificação do risco quando se dispõe de um portfólio de ativos advém do mercado financeiro e visualiza mitigar o risco de comercialização da energia elétrica através da exploração da complementaridade energética existente entre fontes distintas. A introdução do conceito da complementação entre fontes na gestão de risco é fundamental para desenvolver o conceito-chave do “hedge” financeiro que decorre da comercialização conjunta de fontes complementares e permite mostrar uma redução do nível de risco total do portfólio, quando em comparação com o risco inerente a cada fonte individualmente considerada.

A medida de risco implementada no modelo para demonstrar uma redução do nível de risco total do portfólio seria o Value at Risk – Var. Como a distribuição de probabilidades dos fluxos de caixa não possuem, necessariamente uma distribuição normal, implementou-se, uma modelagem baseada no Conditional Value at Risk – CvaR.

Adicionalmente, são discutidas a aplicabilidade do VaR e suas premissas quando inseridas no contexto de empresas não financeiras e no seu mercado de atuação, além de questões como a frequência de sua apuração, a mensuração do valor (patrimonial) do portfólio, a liquidez dos seus ativos e do tipo de ativo avaliado. Esses pontos são discutidos no capítulo 2 – Revisão da Literatura.

Para avaliar a complementaridade energética, abordada no capítulo 5, foram simulados 3 estudos de casos de contratação ótima e 3 estudos de casos de portfólio ótimo.

Nos três estudos de caso de decisão em investimento (portfólio ótimo) ficou patente o fato de que um mix de fontes distintas de geração de energia elétrica, com características complementares, pode se beneficiar da sinergia existente entre as principais fontes de energia renovável presentes na Matriz Energética Brasileira. Embora contraditória, a ideia de que a adição de fontes renováveis de custos elevados pode eventualmente beneficiar o resultado econômico do portfólio de geração, é consistente com a teoria de finanças, se avaliados do ponto de vista do risco/retorno do portfólio como um todo e não como investimento isolado de custo elevado benefício incompatível com o porte do investimento. Uma implicação importante é que em ambientes dinâmicos e incertos, o valor relativo das tecnologias de geração deve ser determinado não pela avaliação das alternativas de investimento individualmente, mas, avaliando as alternativas de carteira de projetos de investimento.

Para tanto, nos capítulos 3 e 4, são apresentados a formulação do problema e da solução otimizada para alocação de um montante de investimento em fontes renováveis, de forma matematicamente rigorosa. Especificamente, o capítulo 3 traz a modelagem da receita para o tipo de problema abordado, ou seja, a receita oriunda da comercialização de energia elétrica a partir de um portfólio de ativos energeticamente diversificados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCEITO DE RISCO E SUA IMPORTÂNCIA PARA AS EMPRESAS (FINANCEIRAS OU NÃO)

O artigo que se constituiu na base para a análise de risco em muitos trabalhos na área financeira foi desenvolvido por Markowitz [28]. Mostrou que é possível selecionar ativos de um portfólio de maneira que o risco seja menor que o ativo de menor risco do portfólio. De modo a iniciar a discussão será abordado primeiramente o conceito de risco. Depois será analisada a aplicabilidade do VaR a empresas não financeiras onde serão verificados alguns aspectos inerentes ao “core business” das empresas não financeiras, com a análise de risco suportada pela métrica VaR. O conceito de risco [8] está associado à dispersão de resultados em torno de um valor esperado. A dispersão está associada ao comportamento da variável aleatória, ou seja, a sua distribuição de probabilidade. Se o valor esperado produz o resultado neutro. Por outro lado qualquer valor diferente deste trará alegrias ou lamentações ao investidor, ou seja, o resultado poderá ser positivo ou negativo. Quando se vislumbra a possibilidade palpável de movimento do resultado positivo para o negativo se diz que o negócio se tornou arriscado.

O que um investidor ou uma empresa busca sempre, dentro da lógica capitalista, são os resultados positivos. Eventualmente um resultado negativo pode ocorrer, porém o que se impõe ser evitado é uma sequência de resultados negativos. Neste contexto, a empresa, mesmo a mais saudável financeiramente, pode sofrer sucessivas descapitalizações de seu caixa, podendo chegar a um ponto em que não haja capital de giro suficiente para honrar seus compromissos [8].

A essas situações, por exemplo, em que a empresa fica exposta negativamente, deveria haver um tratamento especial para preventivamente evitar a ocorrência. Para tanto um gerenciamento adequado dessas situações é requerido nas empresas. Técnicas foram desenvolvidas e aplicadas nas últimas décadas [8].

Resultados positivos ou negativos sempre podem ocorrer, porém o resultado negativo é um resultado indesejável, pois impacta o funcionamento normal da empresa.

Como explica [8], sob a ótica financeira, o correspondente do resultado é o retorno do investimento, estando associado ao movimento das variáveis financeiras e pode ser inferido a qualquer operação. O risco é a dispersão de retornos (resultados) de um portfólio visto de outra forma, o risco é baseado no desvio padrão dos valores. Risco é tão somente uma medida de dispersão de resultados em torno de sua média (ou valor esperado).

Um método [8] para se estimar o valor esperado da perda máxima (ou pior perda) de um portfólio num determinado horizonte de tempo, dentro de um dado intervalo de confiança, em condições de funcionamento normal de mercado é o VaR ou "Value-at-Risk" (Valor em Risco). Exemplificando, se o VaR diário de um portfólio é de R\$ 30MM, com intervalo de confiança¹ de 95%, então em 5% das ocorrências a perda esperada dessa carteira seria maior do que esse valor. Note-se que a noção de VaR está associada a riscos de mudança de valor, isto é, a variação do valor de mercado do portfólio de uma data a outra (no exemplo acima de um dia para outro).

Esta é o primeiro aspecto relativo ao VaR que diferencia as instituições financeiras das corporações. É usual para instituições financeiras calcular seu VaR para um dia de variação dado o volume de negócios normalmente elevado que está associado às suas posições. Para corporações e outros agentes (como fundos de pensão, por exemplo) talvez essa frequência não vá fazer tanto sentido e sejam mais úteis cálculos de variação de valor do portfólio semanais ou mensais.

O segundo aspecto do VaR é relativo à natureza dos ativos dos portfólios que constituem as carteiras. Os ativos que constituem as carteiras de fundos, as tesourarias ou as instituições financeiras, em geral, são ativos com liquidez e marcados a mercado, sendo que seus valores devem traduzir com bastante fidelidade os seus reais valores econômicos. Portanto, pode-se ter, com uma medida

¹Cabe uma observação ressaltada por [28]: o intervalo de confiança utilizado para cálculo do VaR é também em si uma variável de escolha, os mais comuns no mercado financeiro sendo os de 99% e 95% de confiança. Notar, entretanto, que maiores intervalos implicam em maiores valores de VaR (para uma mesma distribuição) uma vez que se consideram mais observações ou uma porção maior das caudas da distribuição. Níveis de confiança muito altos dão informação sobre eventos que aconteceriam teoricamente mais raramente. Há de se considerar se esse é o objetivo mais apropriado para a medida.

única (o VaR), a variação de patrimônio de um período a outro com bom nível de confiança.

Para [8], o fato de se ter em um único número, resume toda a exposição a risco de uma instituição facilitou a aceitação e a expansão na utilização da medida do VaR. Rapidamente esse parâmetro se tornou uma poderosa ferramenta usada por todo o "mundo financeiro" e passou a ser mais bem entendida por todos (investidores, empregados, reguladores, membros do board, etc).

Curiosamente [8], tal "praticidade" é paradoxalmente o grande trunfo e a grande deficiência do conceito de VaR. Por ser o risco uma variável multidimensional, ter uma medida única que consolide em um só número o risco total de uma instituição ou instrumento financeiro exige simplificações. As hipóteses simplificadoras utilizadas para mensuração do VaR irão variar de acordo com seu método de cálculo, que tem como variante a metodologia analítica ou de simulações de preços. Em particular, a simulação de preços é baseada em um método de geração de cenários usando os dados históricos ou através da técnica de Monte Carlo. No presente trabalho adotou-se a simulação de preços gerados a partir de um modelo de despacho hidrotérmico (Newave).

Um terceiro aspecto do VaR em instituições financeiras apontado por [8] que operam portfólios de ativos financeiros e das que não tem como "*core business*" a negociação destes ativos, como por exemplo as corporações, é a liquidez das posições de suas carteiras. Bancos em geral têm em seus portfólios ativos de alta liquidez que podem ser transformados em caixa (se necessário) com relativa rapidez e facilidade. Por outro lado, nas corporações, essa relativa liquidez e facilidade para transformar seus ativos em caixa são bem diferentes. Por isso medir o valor da carteira das corporações pode ser uma tarefa nada trivial. Em muitos casos essa carteira não é composta de ativos que são negociados em mercados organizados, como as bolsas de valores.

Em geral [8], os ativos das corporações (usinas e imóveis, por exemplo) são diferentes daqueles das instituições financeiras e por isso nem sempre é fácil atribuir-lhes um valor monetário. Mesmo fazendo a suposição de que seja fácil a mensuração de seu valor, sob qual ponto de vista se deverá olhar? O valor de um ativo para a empresa poderá ser absolutamente diverso do valor do mesmo ativo

para o mercado. O valor do ativo para o credor talvez em nada se pareça com o valor para o acionista. E ainda: ao se analisar o "valor" de algo, deve-se usar valor econômico ou patrimonial como métrica nas análises?

Os ativos das corporações são, em sua maioria, instalações ou equipamentos, que são usados para produzir um bem ou produto de modo que não faz sentido uma empresa ficar vendendo seu ativo todo dia e comprar outro numa frequência diária como os ativos de uma instituição financeira.

2.2 MENSURAÇÃO DOS RISCOS INCORRIDOS EM MERCADO PARA EMPRESAS NÃO FINANCEIRAS

O conceito de gerenciamento de risco [8] não está, todavia, restrito ao mundo dos bancos e instituições financeiras. Também as empresas (corporações) estão crescentemente atentas aos benefícios da utilização de uma criteriosa análise dos riscos incorridos em seus negócios.

Para o caso de mensuração por instituições financeiras, o VaR aparece como um importante componente dos seus sistemas de "risk management" pois permite que as firmas meçam e controlem os riscos de mercado incorridos por suas posições em carteira, de maneira clara e objetiva².

² Um comentário de [28] sobre "Risk Management": pode-se imaginar a preocupação do CEO de um banco como o Citibank, por exemplo, ao final de cada dia na tentativa de apurar o risco consolidado de todas suas posições, em todos os mercados, de todos os traders, em todas suas filiais, para cada unidade de negócio, em cada continente do planeta... Se não houver uma medida de fácil acesso e compreensão, a mensuração se torna inviável. E o CEO facilmente perderia seu emprego ao gaguejar na reunião de acionistas. A importância, portanto, de mensuração de riscos incorridos vai desde um simples relato gerencial à integração entre áreas e à avaliação de performances. Permite uma visão consolidada do risco incorrido pela companhia e torna decisões de hedge e/ou alavancagem mais transparentes e eficientes. Isso é especialmente relevante num mundo onde as inovações financeiras aparecem com uma velocidade impressionante, onde os negócios são crescentemente globalizados (e/ou integrados globalmente), onde as companhias são cada vez mais corporações globais e onde o uso de instrumentos *não* convencionais (como os derivativos) ficou tão popular quanto o uso de papéis de renda fixa pós-fixada emitida pelo Tesouro.

O que se nota, entretanto, é que a visão de riscos nas corporações está se ampliando muito, rumo a essa visão integrada de riscos, envolvendo também aspectos relativos a controles internos e governança corporativa.

Existem ideias sobre risco em corporações que adotam vertentes associados ao risco ou estratégia (erros em due diligence para aquisições, ou uma campanha de marketing dispendiosa, por exemplo), mas também associadas ao risco de mercado. A questão que imediatamente se coloca então é qual a melhor (ou a mais adequada) forma de medir o risco de mercado em companhias não financeiras. Ou, colocado de outra maneira, como calcular o valor em risco de uma corporação que possui ativos de natureza e liquidez diversas.

Foi no mundo financeiro que nasceu a moderna abordagem de gestão de risco; e justamente por isso, é natural supor que as principais preocupações estejam em determinar "valor". Não é mera coincidência, portanto, que a sua principal métrica (mais especificamente, o VaR) tenha foco em mensurar variação de valor.

Ainda sobre mensuração do risco em corporações, pode-se afirmar que "a melhor abordagem de VaR para empresas (não financeiras) provavelmente conterá múltiplas facetas". Ainda que se faça as adaptações necessárias no VaR para sua utilização por empresas (que denominaremos aqui de "VaR Corporativo"), esse parâmetro sozinho não é uma medida suficiente. Há a necessidade de outras métricas que se adéquem às particularidades e objetivos do mundo corporativo.

O desenvolvimento de metodologias alternativas [8] ao VaR surge a partir da segunda metade da década de 90, ressaltando a sua inadequação junto as corporações. As metodologias propõem o gerenciamento de risco em corporações como um meio de evitar falência financeira, que é uma dimensão não capturada pelo VaR, assim como usar o arsenal introduzido pelo VaR, com extensões adequadas, de forma a se chegar a um indicador que faça sentido para as corporações. Neste sentido, o VaR seria visto como medida de perda potencial de algum fluxo de caixa ao invés do conceito de perda potencial de patrimônio do VaR "tradicional"; essa metodologia se convencionou chamar de "CashFlow-at-Risk", ou CFaR. Há uma diferença ao mesmo tempo sutil e primordial nessa abordagem: enquanto o VaR foca em valor presente, o CFaR se preocupa com fluxo futuro.

2.3 CASH FLOW-AT-RISK

Como afirma [8], as empresas não estão necessariamente interessadas nas variações de seu valor econômico de um período a outro e, talvez, o que faça mais sentido seja criar métricas que suportemos investidores, o controlador ou às áreas de gestão das corporações a noção dos riscos incorridos em se perder (ou se interromper) o seu fluxo de caixa, a geração líquida de caixa da companhia (EBTIDA).

Isso tudo por conta de estarmos lidando com uma dimensão não capturada pelo VaR: a dimensão de fluxo, ao invés do estoque. A variabilidade dos fluxos de caixa deve ser levada em conta quando se trata do mundo corporativo e, portanto, deveria haver uma medida de fluxo em risco. Indo nessa direção, um dos trabalhos pioneiros para cálculo do fluxo de caixa em risco foi desenvolvido por [19], onde os autores propõem uma medida de sensibilidade dos fluxos de caixa a fatores de risco, na tentativa de prever que nível de caixa residual das companhias as impediriam de honrar compromissos e cumprir seus planos de investimentos. Já Turner (1997) apud [8] sugere que se use o arsenal introduzido pelo VaR para criar uma medida de perda potencial de algum fluxo de caixa - o chamado "Cash Flow-at-Risk", ou CFaR. Um dos mais importantes trabalhos sobre CFaR está apresentado na referência[29]. O foco desse documento estava nos potenciais impactos de mudanças nas taxas de mercado sobre os resultados financeiros da empresa em um intervalo de tempo t . Entre as medidas de risco propostas e analisada pelo Corporate Metrics estava o Cash Flow-at-Risk. A metodologia empregada para o cálculo dessa medida tomava emprestados conceitos utilizados para o cálculo do VaR, adaptando-os ao ambiente corporativo, e estendia a tradicional técnica de análise de sensibilidade além de uns poucos cenários extremos, considerando um amplo conjunto de cenários simulados. Um passo necessário para a elaboração do método proposto seria estimar relações econométricas entre os fatores de risco e a variável de interesse (fluxo de caixa) de modo a descrever tão corretamente quanto possível o comportamento dos fatores de risco, mas que também fosse consistente com teorias econômicas relevantes. A sugestão do documento era a utilização dos chamados Vetores Auto-Regressivos (Vector Auto regressive Model ou VARM), nos quais o valor de cada variável

dependeria não só de seus valores passados, mas também dos valores passados de todas as outras variáveis do sistema, o que permitiria a previsão conjunta da média condicional dos fatores de risco.

Define-se:

Cash Flow-at-Risk: valor mínimo de um fluxo de caixa numa determinada data futura (T), a um nível de significância $\alpha\%$ (confiança $1-\alpha\%$), avaliado sob a ótica (com as informações disponíveis) de hoje (t)

Sendo assim, tem-se um enfoque de médio/longo prazo e de fluxo de caixa ao invés de valor. Matematicamente, temos que o CFaR da data futura T, analisado em t, com nível de confiança $1-\alpha\%$ será dado por: $Pr(CashFlow_T < CFaR_t) = \alpha\%$

Assim, se diz que o CFaR a 5% é de 10 milhões de reais, isso quer dizer que o fluxo de caixa ao final do período T terá probabilidade de 5% de ser menor que esse valor.

O CFaR traz, portanto, uma mensuração do risco inerente ao fluxo de caixa da corporação. Difere do VaR ao mensurar fluxo e não estoque de valor. Outra diferença é que cai a hipótese do VaR de constância das posições em carteira dentro do horizonte de investimento analisado. Como seria intuitivo supor, o horizonte de investimento de corporações tende a ser mais longo que o de instituições financeiras e, nesse caso, a hipótese de manutenção das posições se torna pouco verossímil. Cada vez que ocorressem mudanças na carteira, haveria a necessidade da simulação de trajetórias de preços para avaliar entradas e saídas de caixa. Essa análise é bastante mais complexa do que o VaR Corporativo porque envolve cálculos para um horizonte de tempo de muito longo prazo.

2.4 CFAR E O CASH MANAGEMENT

“O CFaR permite também que se faça uma melhor gestão de caixa da empresa ("cash management"). A análise dos possíveis cenários para o nível de caixa da companhia no futuro, procurará responder a pergunta:

Qual o nível mínimo de caixa que se deve ter para uma situação de "financial distress", por exemplo, de interrupção de financiamento por 'n' meses? "[8]

2.5 MAPEAMENTO E CÁLCULO DO CFAR

“Também a forma de mapeamento do CFaR é um pouco diferente do VaR. Enquanto este calcula o valor financeiro (que será a exposição do portfólio a um dado fator de risco) e se multiplica pela volatilidade para se chegar ao VaR da carteira, no caso do Cash Flow-at-Risk o mapeamento será uma função matemática de uma ou mais variáveis, que são os fatores de risco considerados. Assim, o processo de cálculo do fluxo de caixa de um instrumento pode ser dividido da seguinte maneira:

- São definidos os fatores de risco e a função de mapeamento que afetam os fluxos de caixa;
- São montados cenários de médio/longo prazos para tais fatores;
- Tomam-se os valores dos fatores de risco projetados no cenário para as datas de vencimento (ou de pagamento) do instrumento e gera-se o fluxo de caixa.”[8]

Ou seja, o processo de mapeamento do CFaR pode ser resumido como o entendimento e equacionamento do fluxo de caixa de cada instrumento financeiro em função dos cenários projetados para os fatores de risco.

2.6 USO DO CFAR PARA FINS DE HEDGE

Uma discussão interessante feita por [8] que cabe no conceito do Cash Flow-at-Risk é o de sua utilização na implementação de estratégias de hedge para corporações. Foi dito anteriormente a importância e algumas dificuldades para a mensuração de riscos em empresas não financeiras. Uma delas é representada pela dificuldade prática de medida de seus ativos marcados a mercado, uma tarefa nem sempre fácil. Um aspecto que deve ser levado em conta quando da mensuração dos riscos de mercado incorridos no negócio da corporação é, como já mencionado, o fato de se encarar a empresa como uma única carteira, integrada.

Isso implica na identificação de hedges naturais para os fluxos de caixa, o que poderá evitar, por exemplo, custos desnecessários de proteção que seriam de outra forma considerada, caso a empresa fosse entendida como um somatório de

unidades independentes e não de forma integrada. Daí a importância de, quando da mensuração do risco de mercado, se levar em conta as projeções (confiáveis) de fluxo de caixa futuros de curtos e longos prazos a carteira de dívidas e o plano de investimentos. E, uma vez que se esteja com tais informações consolidadas, testar cenários e elaborar as melhores estratégias para cada um deles.

Note-se que todo o esforço em considerar adequadamente os fluxos e enxergar a empresa de forma integrada, visa acima de tudo buscar meios de ampliar o seu valor para os acionistas, protegendo sua trajetória e minimizando os efeitos de eventos extremos não desejáveis. Políticas de preservação de saldos mínimos em caixa e/ou de proteção do plano de investimentos em situações de dificuldades financeiras podem ter correspondido ao diferencial entre a sobrevivência ou não de muitas empresas. Inúmeros os casos ainda daquelas que devem ter se deparado com o dilema de ter que postergar ou declinar excelentes oportunidades, ou de ter que interromper planos de investimento pré-acordados em função de cenário econômico adverso.

Portanto, uma gestão seletiva de riscos que vise reduzir custos de subinvestimentos, que considere os fluxos de caixa da empresa e sua volatilidade no tempo, que entenda e preserve a correlação positiva dos seus resultados com o preço de seus produtos, se mostra como a mais eficaz para garantir o sucesso das companhias. Ao ponto de interferir na competitividade das mesmas, uma vez que busca mensurar e gerenciar riscos que afetam os seus fluxos de caixa e que analisem a capacidade financeira e de solvência das corporações.

De modo que o conceito do VaR fique resguardado porém adequadamente aplicado às corporações, será usado o CFaR nesta pesquisa e em relação a nomenclatura a ser usada, se adotará o VaR por ser mais difundido e utilizado. Vale salientar que são conceitos que tem uma Raiz comum. O Fluxo de caixa em risco – CFaR a ser aplicado nesta pesquisa está focado na receita anual que o investidor impõe como uma receita mínima ao longo do tempo para o projeto de investimento. Esta receita mínima permitida pelo investidor seria o suficiente para honrar seus compromissos e obrigações financeiras para um ano.

Conforme dito anteriormente, o CVaR é empregado quando as distribuições de probabilidades de uma variável aleatória não se comportam como uma distribuição

normal. Portanto, de modo a garantir que os valores extremos ao $\text{VaR}(5\%)$ sejam menores que o $\text{VaR}(5\%)$ adicionalmente adota-se o $\text{CVaR}(5\%)$.

2.7 COMPLEMENTARIEDADE SAZONAL PARA O REGIME HIDROLÓGICO

Muitos trabalhos [1], [2], [3], [4], [5] e [6] tem investigado a característica de complementariedade existente entre as fontes renováveis (energia eólica e hidráulica além da biomassa) do ponto de vista energético. Já outros trabalhos [12] e [13] tem explorado esse aspecto para avaliar a sinergia das fontes existentes na carteira para a contratação ótima com restrição a risco (VaR e CVaR), ou seja, do ponto de vista financeiro. Ainda, outros trabalhos têm focado a diversificação das fontes com sob ótica operativa das redes elétricas devido a intermitência da geração eólica[14], [15], [16], [17], e [18].

Ainda outros trabalhos têm focado na oportunidade da intermitência da geração eólica inserida na estrutura do mercado de energia dos seus países.

Os trabalhos [2], [6] e [7] tem avaliado uma complementariedade, por exemplo, entre a fonte eólica no submercado Sul com uma fonte hídrica no submercado Sudeste (Figura 1) ou entre a fonte eólica e hídrica no Nordeste, no estado de Pernambuco ou mesmo na Bahia. E alguns desses artigos têm mostrado coeficientes de correlação que indicando forte complementariedade.

Figura 1 - Energia Hidráulica (Sudeste) e Energia Eólica em Palmas - Normalizadas - período 1979-1992

Fonte: [2]

Entretanto, os coeficientes de correlação têm sido calculados de valores normalizados ou por unidade (p.u.) das energias eólica e hídrica, que por sua vez são valores mensais de energia pela energia média de longo termo.

Essa normalização dos valores traz para mesma base de comparação grandezas distintas. Consequentemente, tira a noção do real tamanho das fontes eólica e hídrica utilizadas. Portanto, pode-se denominar como complementariedade relativa entre as fontes.

Já o artigo [1] mostra uma complementariedade entre as fontes eólica e hídrica em termos de energia, conforme figura 2. E analisando as curvas de geração hidráulica e eólica, aparentemente, exista uma relação de complementariedade energética, porém se repararmos a escala dos eixos da geração hidráulica (eixo esquerdo) e da geração eólica (eixo direito), os valores mínimos e máximos são bem distintos entre si.

Figura 2 - Integração de usina eólica hipotética de 50 MW em Palmas no subsistema elétrico Sul.

Fonte: [1]

De modo que se possibilite uma maior participação de fontes alternativas e renováveis na matriz energética brasileira, uma implementação de uma política energética estável, eficaz e sustentável se faz necessária no setor elétrico brasileiro.

Os artigos [3], [4] e [5] consideram a racionalização energética pelo lado da oferta por meio da identificação da complementaridade sazonal entre os regimes eólico e hidrológico tendo como um dos seus principais resultados que cada 100 MW médios produzidos pelos parques eólicos instalados no Nordeste proporcionariam, durante um ano, uma economia de energia equivalente à produção obtida a partir de uma vazão de fluente da UHE Sobradinho na ordem de $40\text{m}^3/\text{s}$ e considerando a produtibilidade acumulada de $2,794\text{ MW}/\text{m}^3/\text{s}$.

Por outro lado, se os artigos anteriores têm estado focado na questão da segurança do suprimento energético do mercado brasileiro, avaliando a estabilidade do comportamento sazonal do regime hídrico quando complementado com o regime eólico, os artigos [12] e [15] avaliam a questão da intermitência da fonte eólica conjugado com uma usina de bombeamento no atual contexto do mercado de energia e da economia da Espanha.

O artigo [14] questiona o aumento do nível de penetração da fonte eólica em prejuízo das usinas hidrelétricas, que entram gerando quando a fonte eólica diminui sua geração, devido à diminuição do vento. E levanta a questão de que isso evidencia um custo oculto da energia eólica que não se contabiliza.

Já a metodologia do artigo [11] considera o efeito da diversificação da fonte eólica para a redução do risco de baixas afluições. Foi introduzida uma medida de risco na teoria de seleção de portfólio para avaliar o déficit de energia do sistema. Os resultados simulados têm mostrado uma melhora de 30% no nível de risco.

Um conceito de complementação energética, como forma de demonstrar sinergia existente entre os regimes de ventos e regimes hidrológicos de fontes renováveis com outros parques eólicos, geralmente, são aplicados no planejamento e operação de sistemas elétricos, interligados ou não, de grande porte a micro redes, chamados sistemas híbridos. De outra forma, a diversidade da distribuição do vento de um parque eólico individualmente pode evidenciar uma incerteza expressiva, mas, quando se dispõe de empreendimentos agregados em portfólio, pode-se obter uma importante redução da incerteza das plantas individualmente consideradas frente à incerteza resultante para o portfólio, com consequência positiva na mitigação de riscos na comercialização.

Uma aplicação desse conceito é o Mecanismo de Realocação de Energia – MRE. Esse mecanismo tem por objetivo mitigar o risco hidrológico das usinas hidrelétricas localizadas nas diferentes bacias hidrográficas nos quatro submercados do sistema interligado nacional – SIN por meio de uma contabilização das energias produzidas em relação a garantia física.

Outra vertente do conceito de complementação energética de fontes renováveis, é a aplicação como conceito-chave na gestão de risco. O risco é inerente ao negócio de qualquer mercado e não é exclusivo ao mercado de energia.

A introdução do conceito da complementação na gestão de risco pretende mostrar uma redução do nível de risco total do portfólio quando a fonte eólica fornecer uma distribuição de vento favorável ao portfólio.

Esta última abordagem do conceito de risco é que será adotado para este trabalho.

3 MODELO DA RECEITA

3.1 MODELO DA RECEITA TOTAL ANUAL

A metodologia do CFaR tem como objetivo gerar um fluxo de caixa considerando os fatores de risco inerentes ao negócio. Entretanto, um correto mapeamento de tais fatores de risco se faz necessário. No problema de seleção de portfólio de fontes renováveis com complementaridade energética, no contexto atual da Comercialização de Energia Elétrica, os fatores de risco mapeados são: PLD, energia gerada, MRE, taxa de desconto, custo de investimento e preço de contrato. Os fatores de risco podem ser dependentes da situação econômica conjuntural, como custo de investimento e taxa de desconto, outros podem ser dependentes de sua própria formação como o PLD, preço de contrato, MRE e geração. Para o PLD, MRE e geração foram considerados os dados gerados pelo modelo de otimização de despacho hidrotérmico – NEWAVE. E o restante foi adotado como hipótese do investidor, para parametrização do modelo.

Portanto, para gerar o fluxo de caixa apresenta-se a seguir o equacionamento utilizado. O conjunto das siglas utilizadas no equacionamento do modelo estão descritas ao final desta seção.

A receita ($RT_{a,m,s}$) auferida por um empreendimento de geração de energia elétrica é oriunda do faturamento dos contratos de energia vendida³($RC_{a,m}$) e pelo resultado da contabilização do mercado de curto-prazo – MCP($L_{a,m,s}^C$). O faturamento da energia contratada(C_m^{Port}) é valorado pelo Preço de Venda(P).

$$RT_{a,s} = \sum_{m=1}^{12} RT_{a,m,s}$$

$$RT_{a,m,s} = RC_{a,m} - L_{a,m,s}^C$$

$$RC_{a,m} = C_m^{Port} * P * nh_{a,m}$$

³Estão sendo desconsiderados eventuais contratos de compra ou operações de back-to-back. Atraso na construção das usinas não é modelado ou atraso de qualquer outra natureza (linha de transmissão).

O resultado proveniente da contabilização⁴ do Mercado de Curto-Prazo($L_{a,m,s}^C$) é a diferença($L_{a,m,s}^M$) entre o volume contratado(C_m^{Port}) e a geração($G_{a,m,s}^{Port}$) das usinas valorada pelo PLD($PLD_{a,m,s}$), ou seja, o excedente ou a falta em relação ao que foi vendido através de contrato. Se o valor Contabilizado for negativo ($L_{a,m,s}^M < 0$) então significa que a Geradora pode vender o excedente de energia gerada no MCP e auferir ganho extra de receita em relação ao do contrato. Em contrário($L_{a,m,s}^M > 0$), a Geradora deverá comprar energia no MCP, para cobrir o montante contratado.

$$L_{a,m,s}^C = L_{a,m,s}^M * PLD_{a,m,s} * nh_{a,m}$$

$$L_{a,m,s}^M = C_m^{Port} - G_{a,m,s}^{Port}$$

Cada usina tem uma Garantia Física(GF^{fonte}) que é proporcional($f^{GF,fonte}$) à potência instalada(Pot^{fonte}). A soma das Garantias Físicas das usinas é a Garantia Física do portfólio(GF^{Port}) e uma parte(α) desta garantia física será comercializada em forma de contratos de venda de energia(C_m^{Port}). Esse contrato é definido⁵ em volumes mensais(β_m) de forma a refletir a estratégia do empreendedor.

$$C_m^{Port} = \alpha * \beta_m * GF^{Port}$$

$$GF^{Port} = GF^{PCH} + GF^{Eol} + GF^{Bio}$$

$$GF^{fonte} = Pot^{fonte} * f^{GF,fonte}$$

$$\Sigma \beta_m = 1,0$$

A geração das usinas é determinada de forma diferenciada para cada fonte, enquanto que a energia alocada da PCH ($G_{a,m,s}^{PCH}$), que representa a sua geração, é determinada a partir dos resultados do MRE. A geração da eólica ($G_{a,m,s}^{Eol}$) varia de acordo com as séries de fator de capacidade e a geração da biomassa (G_m^{Bio}), com CVU nulo, é contabilizada de acordo com seus valores de disponibilidade mensal e igual para todos os anos e séries da análise. A geração do portfólio ($G_{a,m,s}^{Port}$) é

⁴O Custo de Geração para hidrelétricas e para eólicas pode ser considerado como nulo, pois ambas não precisam comprar combustíveis para despachar. Para a biomassa analisada, o CVU foi considerado como nulo, como se o combustível fosse resíduo de um processo produtivo da própria empresa e que isto não geraria custos extras de compra e operação. Desta forma, nesta análise o custo de geração não foi considerado.

⁵O processo de definição do volume anual dos contratos de venda de energia se dá em dezembro para o próximo ano e se chama sazonalização. Este processo engloba também a definição do volume mensal das garantias físicas das usinas.

determinada pela soma das gerações das usinas que dele fazem parte. O equacionamento da geração das usinas é apresentado a seguir:

$$G_{a,m,s}^{Port} = G_{a,m,s}^{PCH} + G_{a,m,s}^{Eol} + G_m^{Bio}$$

$$G_m^{Bio} = D_{Max}^{Bio} * D_m^{Bio}$$

$$G_{a,m,s}^{Eol} = D_{Max}^{Eol} * FC_{a,m,s}^{EOL}$$

$$G_{a,m,s}^{PCH} = GF^{PCH} * f_{a,m,s}^{MRE}$$

Além disso, a disponibilidade máxima das usinas eólicas (D_{Max}^{Eol}) e biomassa (D_{Max}^{Bio}) é determinada a partir da Potência instalada, descontando-se as taxas de indisponibilidade forçada e de indisponibilidade programada, a saber:

$$D_{Max} = Pot * (1 - TEIF) * (1 - IP)$$

Já disponibilidade mensal (D_m^{Bio}) da biomassa, em valores percentuais, reflete a sua disponibilidade de combustível no período de safra, e o fator MRE ($f_{a,m,s}^{MRE}$) é determinado a partir da geração ($G_{a,m,s}^{MRE}$) e da garantia física do MRE ($GF_{a,m}^{MRE}$) para um determinado mês, ano e série hidrológica, conforme o equacionamento abaixo:

$$f_{a,m,s}^{MRE} = \frac{G_{a,m,s}^{MRE}}{GF_{a,m}^{MRE}}$$

O perfil mensal do contrato é definido como um “perfil gangorra”, dividido em duas partes, o período úmido e o período seco. Desta forma, uma usina poderia alocar maior volume de sua Garantia Física em um dos períodos com o intuito de minimizar seu risco, desde que o comprador do contrato aceite os termos propostos.

O parâmetro β_m é definido de forma diferente e complementar entre o período úmido e seco, de forma que na contabilização do ano, resulte no total de 100% da GF destinada a contratos de venda. Esta diferenciação é necessária, pois o período seco contém 7 meses e o período úmido apenas 5. Desta forma, o parâmetro é definido através do seguinte equacionamento.

Se $m = 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ou 11 (período seco)

$$\beta_m = (1 - \beta^{Úmido}) * \frac{365}{214}$$

Se $m = 1, 2, 3, 4$ ou 12 (período úmido)

$$\beta_m = \beta^{Úmido} * \frac{365}{151}$$

Onde $\beta^{\text{úmido}}$ representa, em valores percentuais, o volume total de energia entregue nos meses do período úmido, e $(1 - \beta^{\text{úmido}})$ representa o volume total de energia entregue nos meses do período seco. Nos casos em que o contrato é considerado flat, a variável $\beta^{\text{úmido}}$ não é utilizada como variável de decisão da otimização, adquirindo o valor de 41,37%⁶.

Para facilidade de referência, as seguintes siglas se aplicam para todo o conjunto de equações desenvolvido:

a	índice dos estágios de tempo, em que $a = 1, A$;
s	índice das séries de PLD, em que $s = 1, 2000$;
m	índice dos estágios de tempo, em que $m = 1, 12$;
$RT_{a,s}$	receita total anual (R\$)
$RT_{a,m,s}$	receita total mensal (R\$)
$RC_{a,m}$	receita mensal do contrato (R\$)
$L_{a,m,s}^C$	custo no MCP (R\$)
P	preço de venda de contrato (R\$/MWh)
$nh_{a,m}$	número de horas do mês m, no ano a [h]
$L_{a,m,s}^M$	MCP – mercado de curto-prazo [MWmed]
$PLD_{a,m,s}$	preço de liquidação das diferenças do mês m, ano a e série s (R\$/MWh)
C_m^{Port}	montante contratado mensalmente do portfólio [MWmed]
$G_{a,m,s}^{\text{Port}}$	geração do portfólio [MWmed]
α	parcela da Garantia Física do portfólio (G^{Port}) alocada em contrato
β_m	parâmetro mensal para alocação do contrato
G^{Port}	Garantia Física do portfólio [MWmed]
G^{PCH}	Garantia Física da PCH [MWmed]
G^{Eol}	Garantia Física da Eólica [MWmed]
G^{Bio}	Garantia Física da Biomassa [MWmed]
Pot^{fonte}	potência instalada de cada fonte [MW]

⁶A fração $151/365 = 41,37\%$ referente ao $\beta^{\text{úmido}}$ resultam em um contrato flat.

$f_{GF,fonte}$	fator de GF de cada fonte
$G_{a,m,s}^{Port}$	geração do portfólio [MWmed]
$G_{a,m,s}^{PCH}$	geração da PCH [MWmed]
$G_{a,m,s}^{Eol}$	geração da Eólica [MWmed]
G_m^{Bio}	geração da Biomassa [MWmed]
$DMax^{Bio}$	disponibilidade máxima da usina biomassa [MWmed]
D_m^{Bio}	disponibilidade mensal da biomassa [MWmed]
$DMax^{Eol}$	disponibilidade máxima da usina eólica [MWmed]
$FC_{a,m,s}^{EOL}$	fator de capacidade da usina eólica
$f_{a,m,s}^{MRE}$	fator MRE
$G_{a,m,s}^{MRE}$	geração do MRE [MWmed]
$GF_{a,m}^{MRE}$	garantia física do MRE [MWmed]
$\beta^{úmido}$	representa, em valores percentuais da garantia física expressa em MWh anuais, o volume total de energia entregue nos meses do período úmido, e $(1 - \beta^{úmido})$ representa o volume de energia entregue nos meses do período seco

3.2 MODELO DA RECEITA DA LÍQUIDA (OU VALOR PRESENTE LÍQUIDO POR SÉRIE)

A avaliação dos projetos é realizada contabilizando-se o Valor Presente Líquido (VPL_s) da Receita Líquida ($RL_{a,s}$) para as 2000 séries sintéticas utilizadas partir das receitas e dos custos dos projetos.

$$VPL_s = \sum_{a=1}^9 \frac{RL_{a,s}}{(1+i)^a}$$

A Receita Líquida ($RL_{a,s}$) é calculada para cada ano e série através da subtração do CAE da Receita Total do Portfólio ($RT_{a,s}$), conforme equacionamento a seguir:

$$RL_{a,s} = RT_{a,s} - CAE^{Port}$$

O Custo Anual Equivalente - CAE é uma maneira de representar o custo do investimento ao longo da vida útil de um empreendimento (determinado

individualmente para cada tipo de usina), e a soma destes valores resulta no CAE do Portfólio (CAE^{Port}) que é igual para todos os anos e séries da análise.

Nessa metodologia, a fórmula do CAE é uma função da taxa de juros (i), vida útil do empreendimento (nu^{fonte}) e do investimento total com a incidência dos Juros Durante a Construção - JDC (I_{JDC}^{fonte}).

$$CAE^{fonte} = \frac{i * (I_{JDC}^{fonte}) * (1 + i)^{nu^{fonte}}}{((1 + i)^{nu^{fonte}} - 1)}$$

Nota-se que com essa abordagem, as despesas financeiras são uniformizadas ao longo da vida útil de cada projeto na forma das parcelas do CAE. A vantagem de tal método suporta-se no fato de que, na análise de um fluxo de caixa, ao se truncar as séries ao final do horizonte de análise econômica (ex: decenal) se leva em conta implicitamente o valor residual, que será diferente para cada caso e permite prescindir da adoção de hipóteses “fortes” e discutíveis, como por exemplo, repetir o último ano da análise indefinidamente, até o final do horizonte de contrato.

O desembolso financeiro na fase de construção (pré-operacional), ao ser realizado ao longo do tempo e com parcelas distintas, implicará na geração de Juros Durante a Construção (JDC). Esses juros são capitalizados a valores futuros (na data de início da operação). No modelo adotamos a premissa de que todas as Usinas entrarão em operação na mesma data (A-0) e que, a depender do projeto, estes terão um tempo de construção distinta ajustada para iniciar a operação comercial na mesma data (A-0).

Como os investimentos parciais (I_a^{fonte}) ocorrem em tempos distintos, há um efeito diferenciado dos juros que incidem durante a fase de construção. Esse efeito também é influenciado pelo montante desembolsado em cada parcela. O equacionamento do Investimento total com incidência do JDC (IJDC), sendo $a = NI$ é o NI-ésimo ano anterior à entrada em operação e $a = 1$ é o ano de entrada em operação é apresentado a seguir:

$$I_{JDC}^{fonte} = \sum_{a=1}^{NI} I_a^{fonte} * (1 + i)^{(a)}$$

O custo dos investimentos é auferido com base em algumas características das usinas, como a vida útil dos empreendimentos, os cronogramas de desembolso de capital (%) para a construção e os custos unitários das fontes.

Determina-se o valor total do Investimento em cada usina (I^{fonte}) a partir do custo unitário (CI^{fonte}) e da potência instalada de cada planta (Pot^{fonte}). Esse valor será desembolsado em parcelas ao longo da fase pré-operacional dos projetos, conforme definido no parâmetro de entrada correspondente e em função da particularidade de cada projeto.

$$I^{fonte} = CI^{fonte} * Pot^{fonte}$$

Sendo:

a	índice dos estágios de tempo, em que $a = 1, NI$;
s	índice das séries de PLD, em que $s = 1, 2000$;
VPL_s	Valor Presente Líquido (R\$)
$RL_{a,s}$	Receita Líquida (R\$)
i	taxa de juros (%)
$RT_{a,s}$	Receita Total do Portfólio (R\$)
CAE^{Port}	Custo Anual Equivalente do Portfólio (R\$)
CAE^{fonte}	Custo Anual Equivalente por fonte (R\$)
I_{JDC}^{fonte}	Investimento total com incidência do JDC (R\$)
nu^{fonte}	vida útil [anos]
I^{fonte}	total do Investimento em cada usina (R\$)
CI^{fonte}	custo unitário de cada planta (R\$/MW)
Pot^{fonte}	potência instalada de cada planta [MW]

4 FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO EM FONTES RENOVÁVEIS COM GESTÃO DO PORTFÓLIO SOB RESTRIÇÃO DE RISCO

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO EM FONTES RENOVÁVEIS

O objetivo de um investidor é remunerar adequadamente o capital investido. O investidor dispõe de recursos próprios ou de terceiros de modo a garantir uma disponibilidade para a aplicação em determinado(s) projeto(s). A avaliação de um projeto de investimento pode determinar se um projeto será viável ou não dentro de certos parâmetros definidos pelo investidor. Uma das técnicas utilizadas para avaliar a viabilidade de um projeto de investimento é o Valor Presente Líquido – VPL. Esta técnica permite avaliar se um determinado projeto agregará valor financeiro ao investidor caso o VPL seja positivo. Caso o VPL seja negativo o projeto certamente será inviável e, portanto descartado. E quanto maior for o VPL mais o projeto agregará valor ao investidor. Um indicador complementar é a TIR – Taxa Interna de Retorno, que indica a taxa de atratividade de capital para a qual o VPL do Fluxo de Caixa do Projeto ou Portfólio é nulo. Como a TIR normalmente é expressa em valores percentuais, facilitando a especificação de paradigmas, acaba sendo mais utilizada na linguagem de mercado, embora na prática incorpore a mesma informação do VPL.

Considerando as ponderações expostas foi então modelada uma solução para o problema de avaliação de projeto de investimento baseado na maximização do Valor Presente Líquido, posto que esse parâmetro não tenha alguns inconvenientes matemáticos que podem surgir no caso da TIR (soluções múltiplas, por exemplo). Além disso, como se estará trabalhando com variáveis estocásticas (o Fluxo de Caixa depende da série hidrológica e/ou de vento considerada), o modelo será desenvolvido norteado pelo conceito de “*Cash Flow at Risk*”, ao invés de modelagem de Fluxo de Caixa determinístico convencional.

Desta forma, a função objetivo é a maximização do VPL médio do portfólio, sujeito às restrições orçamentárias de Valor Máximo de investimento total (IMax) e aversão ao risco, CVaR da receita anual ($CVaR_{RT,Limite}$) e do VPL ($CVaR_{VPL,Limite}$).

O CVaR mínimo do VPL foi definido nas restrições da otimização com valor zero, desta forma o investidor terá para a média dos 5% piores cenários do modelo no mínimo a taxa de desconto definida para o investimento. As variáveis de decisão são o percentual contratado do portfólio e a potência instalada de cada uma das fontes.

$$\text{Max } E[VPL_s]$$

Função-Objetivo

Sujeito à:

$$\begin{aligned} I_{JDC}^{Port} &\leq IMax \\ I_{JDC}^{Port} &= I_{JDC}^{PCH} + I_{JDC}^{Bio} + I_{JDC}^{Eol} \\ I_{JDC}^{fonte} &= \sum_{a=1}^5 I_a^{fonte} * (1+i)^{(a)} \\ I^{fonte} &= CI^{fonte} * Pot^{fonte} \end{aligned}$$

Restrição de Investimento

$$\begin{aligned} CVaR_{RT}(5\%) &\geq CVaR_{RT,Limite} \\ CVaR_{RT}(5\%) &= \frac{\sum_{a=1}^9 \sum_{s=1}^{2000} RT_{a,m,s}}{900}, \forall RT_{a,m,s} \\ &\leq RT_{5\%} \\ CVaR_{VPL}(5\%) &\geq CVaR_{VPL,Limite} \\ CVaR_{VPL}(5\%) &= \frac{\sum_{s=1}^{2000} VPL_s}{100}, \forall VPL_s \leq VPL_{5\%} \end{aligned}$$

Restrição de Risco

$$0 \leq \alpha \leq 100\%$$

Restrição de parcela da Garantia Física do portfólio (GF^{Port}) alocada em contrato

$$0 \leq \beta^{Umido} \leq 100\%$$

Restrição de Perfil de Contratação

$$0 \leq \text{Pot}^{\text{Eol}}, \text{Pot}^{\text{Bio}}, \text{Pot}^{\text{PCH}} \leq 30$$

Restrição de Capacidade das usinas

Sendo:

a	índice dos estágios de tempo, em que $a = 1, A$;
s	índice das séries de PLD, em que $s = 1, 2000$;
$RL_{a,s}$	receita líquida de cada ano e série (R\$)
i	taxa de juros (%)
I_{JDC}^{Port}	Investimento total com incidência do JDC (Juros Durante
a Construção) (R\$)	
$I_{JDC}^{\text{PCH}}, I_{JDC}^{\text{BIO}}, I_{JDC}^{\text{EOL}}$	Investimento em cada usina (PCH, Biomassa e Eólica)
(R\$)	
CI^{fonte}	custo unitário por fonte (PCH, Biomassa e Eólica)
(R\$/MWh)	
$\text{Pot}^{\text{fonte}}$	potência instalada de cada planta (PCH, Biomassa e
Eólica) [MW]	
$IMax$	representa o investimento máximo a ser realizado pelo
empreendedor (R\$)	
$CVaR_{RT}(5\%)$	representa a média dos 5% piores casos da Receita Total
Anual (R\$)	
$CVaR_{RT, \text{Limite}}$	representa a menor Receita Total Anual aceita pelo
empreendedor (R\$)	
m	índice dos estágios de tempo, em que $m = 1, 12$;
$CVaR_{VPL}(5\%)$	representa a média dos 5% piores casos de VPL do
portfólio de empreendimentos (R\$)	
$CVaR_{VPL, \text{Limite}}$	representa o menor VPL aceito pelo empreendedor (R\$)
α	parcela da Garantia Física do portfólio (GF^{Port}) alocada
em contrato	

$\beta^{\text{Úmido}}$ representa, em valores percentuais da garantia física expressa em MWh anuais, o volume total de energia entregue nos meses do período úmido, e $(1 - \beta^{\text{Úmido}})$ representa o volume total de energia entregue nos meses do período seco

$Pot^{\text{Eol}}, Pot^{\text{Bio}}, Pot^{\text{PCH}}$ potência de cada empreendimento (fonte incentivada) [MW]

A Restrição de Investimento representa a disponibilidade de recurso por parte do empreendedor I_{Max} . As restrições de custo financeiro também incorporam o custo do projeto calculado com base em algumas características das usinas, a vida útil dos empreendimentos, os cronogramas de desembolso de capital (%) para a construção e os custos unitários das fontes.

A Restrição de Risco representa a aversão do empreendedor à perda financeira em termos de receita anual ou ao valor presente líquido em determinados valores limites. Um empreendedor não poderia suportar receitas anuais abaixo de determinado valores limites devido ao seu fluxo de caixa. Para tanto, modela-se o CVaR(5%) da Receita Total Anual ($CVaR_{RT}(5\%)$), que representa a média dos 5% piores casos. Considerando que o horizonte de análise é de 9 anos e que existem 2000 séries sintéticas, isto resulta em um total de 18.000 valores de Receita Anual. Desta forma, o percentil 5% é representado pela 900ª pior Receita Anual, aqui identificada como $RT_{5\%}$, e o CVaR é determinado a partir do equacionamento da restrição.

Do ponto de vista do Investidor, um projeto de investimento é viável quando agrega um valor (VPL) maior em relação a outro projeto de investimento. De modo a representar isto, uma segunda restrição de risco é adicionada ao modelo. Conforme já explicitado, o CVaR(5%) do VPL ($CVaR_{VPL}(5\%)$) traduz na média dos 5% piores casos de VPL. Considerando que existem 2000 séries sintéticas, o percentil 5% é representado pelo 100ª pior valor de VPL, aqui identificado como $VPL_{5\%}$, e o CVaR é determinado a partir do equacionamento da restrição.

A Restrição de Capacidade das usinas limita o tamanho das usinas em 30 MW para que se caracterizem como fontes incentivadas (solar, eólica e biomassa), que possuem desconto na TUSD de acordo com a Resolução ANEEL Nº 247/2006.

A Restrição de parcela da Garantia Física do portfólio (GF^{Port}) alocada em contrato representa o volume de Garantia Física será alocada em contratos de venda.

A Restrição de Contratação representa o perfil de alocação da energia em contratos de venda nos períodos úmido e seco. Este perfil mensal do contrato é definido como um “perfil gangorra”. Desta forma, uma usina poderia alocar maior volume de sua Garantia Física em um dos períodos com o intuito de minimizar seu risco, desde que o comprador do contrato aceite os termos propostos.

4.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE INVESTIMENTO EM FONTES RENOVÁVEIS E GESTÃO DO PORTFÓLIO SOB RESTRIÇÃO DE RISCO [17]

4.2.1 A Estrutura de um Algoritmo Evolutivo

A estrutura⁷ de um algoritmo evolutivo [32] pode ser colocada na forma descrita a seguir.

Neste algoritmo, $P(t)$ denota uma população de μ indivíduos na geração t . Q representa um conjunto de indivíduos que podem ser considerados para a seleção.

Por exemplo, Q pode ser igual ao conjunto $P(t)$, no entanto Q também pode ser igual ao conjunto nulo. Desta forma o conjunto Q pode ser escrito como uma função da população $P(t)$, ou seja, $Q(t) = f[P(t)]$.

Uma nova geração de indivíduos $P'(t)$ de tamanho λ é gerada pela variação do conjunto $P(t)$ através de operadores tais como cruzamento e/ou mutação.

⁷ Existem basicamente três algoritmos para computação evolutiva:

algoritmos genéticos – introduzidos por [33] com o objetivo de formalizar matematicamente e explicar rigorosamente processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais (simulados em computador) que retenham os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais. Os algoritmos genéticos empregam operadores chamados “crossover” ou “cruzamento (em Português)” e mutação (a serem apresentados mais adiante);

programação evolutiva – introduzida por Fogel, foi originalmente proposta como uma técnica para criar inteligência artificial através da evolução de máquinas de estado finito (FSM). Recentemente, a programação evolutiva tem sido aplicada a problemas de otimização;

estratégias evolutivas – por Rechenberg e Schwefel, foram inicialmente propostas com o objetivo de solucionar problemas de otimização de parâmetros, tanto discretos como contínuos. Em virtude de empregarem principalmente os operadores de mutação, grandes contribuições em relação à análise e síntese destes operadores foram elaboradas.

Apesar das abordagens supracitadas terem sido desenvolvidas de forma independente, seus algoritmos possuem uma estrutura comum. O termo algoritmo evolutivo é usado como uma denominação comum a todas essas abordagens.

```
t = 0;
inicie P(t);
avale P(t);
enquanto (critério de parada não satisfeito) faça
    P'(t) = variação P(t);
    avale P'(t);
    Q(t) = f[P(t)];

    P(t + 1) = seleção [P'(t) U Q(t)];
    t = t + 1
fim
```

Os novos indivíduos $P'(t)$ são então avaliados medindo-se a “distância” de cada um destes da solução “ótima” do problema considerado.

Como produto da avaliação, a cada indivíduo é atribuído uma nota (medida de adaptação), sendo que as maiores notas são atribuídas aos indivíduos que representam uma solução mais próxima da almejada. Então, uma nova população é formada na iteração $t + 1$ pela seleção dos indivíduos mais adaptados.

Após um determinado número de gerações, a condição de parada deve ser atendida, a qual usualmente indica a existência, na população, de um indivíduo que represente uma solução aceitável para o problema, ou quando o número máximo de gerações foi atingido.

As abordagens evolutivas apresentadas nesta seção diferem em diversos aspectos, dentre os quais se destacam: estruturas de dados utilizadas para codificar um indivíduo, operadores genéticos empregados, métodos para criar a população inicial e métodos para selecionar indivíduos para a geração seguinte. Entretanto, perdura o princípio comum: uma população de indivíduos sofre algumas transformações e durante a evolução os indivíduos competem pela sobrevivência.

4.2.2 Algoritmo Genético

4.2.2.1 Características Gerais

A principal motivação na aplicação de AGs vem de sua potencialidade como uma técnica de otimização de características particulares, combinando intrinsecamente procedimentos de busca direcionada e aleatória, de modo a ser obtido o ponto ótimo de cada função, mesmo quando esta apresenta características não lineares, múltiplos picos e descontinuidades. Assim, os AGs realizam uma busca que evita convergência para ótimos locais.

Em problemas específicos, a principal motivação é quanto à dimensionalidade do problema, em função do número de variáveis envolvidas. Além de ser um problema de natureza combinatória, também apresenta algumas dificuldades na modelagem, principalmente quando são utilizados métodos convencionais de otimização. Em AGs, o espaço de possíveis soluções é percorrido com certa aleatoriedade incorporada, porém sem ser um tipo de busca sem direção, levando à grande eficiência para a obtenção da solução almejada do problema real em questão.

A principal vantagem dos AGs em relação aos outros métodos de busca e de otimização refere-se a sua robustez, pois os seguintes pontos básicos os diferem dos demais:

- AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros, e não com os parâmetros propriamente ditos;
- AGs trabalham a partir de uma população de soluções alternativas e não a partir de uma alternativa única;
- AGs se utilizam de informações de sua função objetivo e não de suas derivadas ou informações auxiliares;
- AGs utilizam regras de transições probabilísticas para busca no espaço de soluções e não regras determinísticas.

Algoritmos genéticos partem de uma string, elemento que deve ter uma relação explícita com os parâmetros do problema; tal relação, conforme detalhado adiante, define uma dada codificação. Assim, conforme mencionado anteriormente, os parâmetros do problema não são diretamente tratados pelo AG.

Uma string é composta por diversos bits, sendo que cada bit pode assumir o valor 0 ou 1; no exemplo abaixo, o string contém 6 bits.

Figura 3- Exemplo de uma string

1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	0

Fonte: [17]

Uma string pode ser entendida, da genética, como um cromossomo que apresenta genes (ou bits), em diferentes loci do cromossomo (posições da string), representando diversas características de um indivíduo. O valor de cada gene, que corresponde à determinada característica, corresponde a um alelo. Ainda, o pacote genético, normalmente chamado de genótipo, pode ter a sua correspondência em AGs pelas estruturas de dados que definem a string. A interação deste pacote genético com o ambiente, que define as características do indivíduo é chamada de fenótipo, o que corresponde em AGs, na decodificação da estrutura para formar uma possível solução alternativa ou possível conjunto de parâmetros de solução do problema.

Conforme mencionado anteriormente, AGs trabalham com uma população de soluções alternativas, e não uma alternativa única. Ou seja, estabelecida a regra de formação de uma string e sua relação com o problema real (codificação), um AG trabalha com diferentes combinações de string, ou um número de indivíduos, que irão compor uma população.

Uma vez estabelecido o elemento básico de AGs, isto é, uma string, e sua relação com o problema real, ou seja, sua codificação, o mecanismo de um AG é relativamente simples. O problema básico reside na determinação do “melhor” indivíduo ou o “mais ajustado”, o que é medido por uma função de avaliação aplicada a cada indivíduo. Tal função deverá, obviamente, apresentar relação com a função objetivo. Daí também ser designada a função de avaliação como função de ajuste (fitness function). A função de avaliação pode ser considerada o segundo ponto de relacionamento do AG com o problema real.

A população inicial de indivíduos, ou seja, um conjunto inicial de strings é geralmente estabelecido de modo aleatório, conforme será visto posteriormente.

Em seguida, as populações evoluem em gerações, basicamente através de 3 operadores:

- Reprodução / Seletividade ou elitismo, que corresponde a um processo no qual os indivíduos são copiados para a geração futura em função de sua função de avaliação.
- Cruzamento, que corresponde a um operador que atua sobre um par de strings escolhidos aleatoriamente.
- Mutação, que corresponde a um operador que pode modificar, com certa probabilidade, os valores de genes dos strings.

Ou seja, os 3 operadores descritos são aplicados sobre uma dada população para formar uma nova geração; geralmente o número de indivíduos ao longo de gerações é mantido constante. Os operadores de elitismo, cruzamento e mutação são de implementação extremamente simples, o que é uma das vantagens da utilização de AGs. Esses operadores são responsáveis por realizar as operações que imitam, de certa forma, fenômenos da natureza, como a teoria da seleção natural de Darwin.

Desta forma, espera-se que as populações, de geração a geração, tornem-se cada vez melhores ou ajustadas, o que é medido pelas funções de avaliação de seus indivíduos. O melhor indivíduo, aquele com maior valor desta função, depois de um determinado número de gerações, representa a solução do problema em questão. O algoritmo genético é apresentado, de modo simplificado, no diagrama de blocos apresentado a seguir.

4.2.2.2 Elemento básico – string

Na aplicação de AGs à otimização do portfólio de usinas e do perfil de contratação, o montante referente a cada fonte no portfólio, o montante contratado e a sazonalização do contrato formam o fenótipo do indivíduo e o genótipo é a codificação destes parâmetros em números binários. A figura a seguir representa o genótipo de um indivíduo para este problema.

Figura 4- Diagrama de blocos de um AG

Fonte: [17]

Figura 5- Gentipo do problema de otimizao

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
Placa_PCH				Placa_Biomassa				Placa_contratada				Perfil_�mido			

Fonte: [17]

No exemplo apresentado acima, todos os parmetros so codificados em 4 bits, ocupando 4 ocus do cromossomo. A placa da fonte elica no representada no modelo de otimizao, pois a mesma complementar as placas da PCH e da Biomassa como restrio de investimento ou de placa mxima. Igualmente o perfil seco tambm no representado, pois este complementar ao perfil mido.

O fentipo do exemplo apresentado acima nada mais que a decodificao dos valores binrios valores de garantia fsica (placa) para as fontes e em porcentagens para as placas contratada e para o perfil de contratao.

Para fazer esta transformação inicialmente é necessário definir os intervalos pertinentes a cada variável. Os seguintes intervalos foram definidos:

Placa_PCH: $0 \leq PCH \leq 10$ MWmédio

Placa_Biomassa: $0 \leq BIO \leq 10$ MWmédio

Placa_Contratada: $0 \leq Y \leq 100\%$

Perfil_Úmido: $0 \leq H \leq 100\% * (12/5)$

A partir da definição dos intervalos de cada parâmetro, o cálculo do fenótipo é realizado da seguinte forma:

$$Par_i = \frac{(2^0 * bit_{i,1} + 2^1 * bit_{i,2} + 2^2 * bit_{i,3} + 2^3 * bit_{i,4})}{(2^4 - 1)} * (Par_{i,MAX} - Par_{i,MIN}) + Par_{i,MIN} \quad (8)$$

A seguir apresenta-se o cálculo da Placa_PCH, utilizando os dados da figura 5, como forma ilustrativa, sendo que o fenótipo desse mesmo exemplo é apresentado na Figura 20.

$$X = \frac{(2^0 * 1 + 2^1 * 1 + 2^2 * 0 + 2^3 * 0)}{(2^4 - 1)} * (10 - 0) + 0 = 2 \text{ MWm} \quad (9)$$

Figura 6- Fenótipo do problema de otimização de parâmetros na formação de preços

Placa_PCH	Placa_Biomassa	Placa_Eol	Placa_Contratada	Perfil_Úmido	Perfil_Seco
2	6	2	80%	26,6%	73,4%

Fonte: [17]

4.2.2.3 Avaliação da população

Conforme visto nos itens anteriores, é intuitivo pensar que quanto maior for a função de avaliação, mais ajustado um determinado indivíduo vai estar com relação às características desejadas.

No caso de problemas de otimização, o objetivo de maximizar ou minimizar determinado atributo, que é função de variáveis do problema, deve ser mapeado na função de avaliação. Obviamente, diferentes formas de mapeamento levarão a diferentes características de convergência e direcionamento da busca da solução ótima, ou seja, de desempenho do AG.

Para este trabalho em específico, a função de avaliação corresponderá a receita média do portfólio de usinas para a dada configuração de contrato, sendo que as restrições do problema devem entrar como punições, diminuindo a função de avaliação. O fator de punição deverá ser mais bem definido a partir de simulações exploratórias.

Cada indivíduo terá, portanto, uma configuração de usinas no portfólio e uma configuração do contrato e suas avaliações serão as receitas médias no período de contratação respeitando-se às restrições do problema. O cálculo das receitas médias e dos critérios de risco de cada indivíduo será realizado utilizando-se a metodologia apresentada no capítulo anterior. A função de avaliação será então obtida pela equação que se segue:

$$F_{\text{avaliação}} = \frac{\text{Receita Média}}{\text{Punição(Montante)} * \text{Punição(Risco)}} \quad (10)$$

A punição referente ao risco ocorre quando o risco do portfólio excede o critério de risco admissível pelo empreendedor. Neste caso o indivíduo é punido conforme a Figura 7, apresentada na sequência.

A punição referente ao montante ocorre quando a soma das placas das usinas excede o nível máximo do portfólio. Neste caso a placa da eólica é nula e o indivíduo é punido conforme a figura 8 a seguir.

4.2.2.4 População inicial

O número de indivíduos da população, em cada geração, deve ser fixado a priori, o que é um dos parâmetros importantes de um AG. Não existe nenhum valor padrão a ser utilizado para o tamanho da população, variando de problema a problema.

Figura 7- Punição de Montante

Fonte: [17]

Figura 8- Punição de Risco

Fonte: [17]

Em geral, a população inicial de um AG é estabelecida de maneira aleatória. Se isso fosse feito manualmente, bastaria determinar o valor de cada bit de cada string (ou indivíduo) da população inicial através do lançamento de uma moeda, dado que as probabilidades do resultado ser cara ou coroa são iguais a 50% cada; ou seja, ao valor do bit igual a 0 poderia ser associado o resultado cara e igual a 1, o resultado coroa.

Obviamente, a operação manual acima seria bastante trabalhosa, pois o número de lançamentos de moeda seria igual ao número de bits de cada string multiplicado pelo número de indivíduos da população, o que pode chegar a milhares de lançamentos. Os computadores contam com funções que geram números aleatórios com distribuição uniforme. Em geral o número é aleatoriamente gerado no intervalo $[0,1]$ como mostrado na figura a seguir, onde $p(x)$ representa a função densidade de probabilidade da variável aleatória x .

Figura 9- Distribuição uniforme

Fonte: [17]

Desta forma, a geração da população inicial torna-se bastante simples, bastando utilizar tal função de geração de números aleatórios (que será designada daqui para frente simplesmente como função Rnd, referenciando o modo utilizado em VBA no Excel).

Gera-se um número aleatório para cada bit de cada string da população. Para cada número aleatório gerado, testa-se se o seu valor é menor que 0,5; se sim o valor do bit é feito igual a 0 e se não o valor do bit é feito igual a 1. A seguir é apresentado o fluxograma para a determinação da população inicial.

Figura 10 - Estabelecimento da população inicial

Fonte: [17]

4.2.2.5 Elitismo

O AG básico descarta a geração anterior e considera para a futura apenas os descendentes obtidos. A técnica Elitista consiste em reintroduzir o indivíduo melhor avaliado de uma geração para a seguinte, evitando a perda de informações importantes presentes em indivíduos de alta avaliação e que podem ser perdidas durante os processos de seleção e cruzamento. Algumas técnicas controlam o número de vezes que o indivíduo pode ser reintroduzindo, o que contribui para evitar convergência a máximos locais.

Outra forma de implementar o elitismo seria ao final das operações de cruzamento e mutação, considerando para a geração futura os melhores entre os pais e descendentes.

Esta técnica, naturalmente reintroduz os melhores avaliados na geração seguinte, indefinidamente. Em AGs, as gerações são mantidas com número fixo de indivíduos, μ , que geram λ descendentes, sendo $\mu = \lambda$. Este método de seleção é também conhecido como $(\mu + \lambda)$.

4.2.2.6 Seleção de indivíduos

A cada geração devem-se selecionar quais indivíduos possuirão cópias e quais deverão desaparecer. Assim, um operador de seleção cujo objetivo é selecionar os indivíduos que sofrerão cruzamento e mutação torna-se imprescindível.

A seleção pode ser definida de maneira simples como sendo a escolha probabilística de indivíduos de uma população tendo como base suas aptidões e, da mesma forma que ocorre no processo de seleção natural, os indivíduos mais qualificados ou aptos, de acordo com a função objetivo, têm mais chances de ser selecionados.

Para privilegiar os indivíduos mais aptos no processo de seleção, a cada membro da população é atribuído um valor absoluto dado por uma função denominada de função de aptidão, recebendo como entrada os valores do gene do indivíduo e fornecendo como resultado sua aptidão.

Ao se associar uma nota de aptidão a cada indivíduo da população, escolhe-se então um subconjunto de indivíduos da população atual, gerando uma população intermediária. Métodos como da Roleta do Torneio [32] e [33] e do Método da Amostragem Universal Estocástica [31], além do Elitismo, são alguns daqueles sugeridos para a solução deste tipo de problema com aplicação de AGs.

O termo pressão seletiva (“selective pressure”) [30] é frequentemente empregado para denotar quanto o método de seleção empregado considera o valor de avaliação dos indivíduos: quanto maior a “pressão” ou quanto mais o método de seleção considera a avaliação dos indivíduos, maior a tendência à exploração das soluções já existentes e maiores a velocidade de convergência.

Por outro lado, esquemas de seleção que pouco consideram o valor de avaliação das soluções tendem a pesquisar melhor o espaço de soluções, aumentando a confiabilidade da solução indicada como ótima.

Como alternativas ao método de seleção proporcional do AG básico (Roleta), o Torneio (“Tourment”) [32] sorteia aleatoriamente dois indivíduos para cruzamento e seleciona para participar de um cruzamento aquele com melhor avaliação. Uma variante deste método, o Torneio-q (“q-Tourment”) sorteia um número q de indivíduos, $q > 2$ e seleciona o melhor deles. Este método foi aplicado como operador de seleção neste caso.

A figura a seguir exemplifica a aplicação do método do torneio, com $q = 2$.

Figura 11 - Método do torneio

Fonte: [17]

4.2.2.7 Cruzamento

A reprodução é uma etapa inspirada na natureza e tem por objetivo criar novas soluções na população.

O princípio básico dos operadores de cruzamento é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores de cruzamento são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

Durante a fase de reprodução, selecionam-se indivíduos da população que serão recombinados para formar descendentes que, por sua vez, constituirão a geração seguinte. Os pares são selecionados aleatoriamente, usando um método que favoreça os indivíduos melhor adaptados. Seus cromossomos se mesclam e se combinam.

O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante o processo reprodutivo, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. É considerado o operador genético predominante, por isso é aplicado com probabilidade dada pela taxa de cruzamento entre 70 e 100%.

Quanto maior for essa taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar. Existem diversos tipos de operadores de cruzamento, porém, os mais tradicionais são:

- Cruzamento em 1 ponto: Seleciona-se um ponto de corte do cromossomo e, a partir desse ponto, realiza-se a troca de material cromossômico entre os dois indivíduos, gerando dessa forma dois descendentes, onde cada um dos dois filhos recebe informação genética de cada um dos pais. Considerações importantes acerca desse tipo de cruzamento é que os filhos gerados podem ser completamente diferentes dos pais, mantendo características em comum. A posição onde o gene paterno apresenta o mesmo valor não é modificada com o cruzamento, garantindo que as melhores informações sejam transferidas aos descendentes.
- Cruzamento em 2 pontos: No cruzamento em dois pontos procede-se de maneira similar ao cruzamento de um ponto, selecionando-se aleatoriamente dois pontos de corte do cromossomo e trocando o material cromossômico entre os dois indivíduos, gerando dois descendentes;

- Cruzamento Disperso: Este tipo de cruzamento apresenta grande diferença dos demais. O ponto de corte é substituído por um vetor binário aleatório também chamado de máscara. A cópia dos genes dos pais segue a indicação dos bits da máscara. Ou seja, quando o bit da máscara corresponde a 1, então o filho recebe o bit do pai “1”. Da mesma forma, quando o bit da máscara corresponde a 0, o filho recebe o bit do pai “2”;
- Cruzamento Uniforme: O cruzamento uniforme e o disperso são semelhantes, no entanto, após o cruzamento uniforme surgirão dois novos filhos, ao invés de apenas um como ocorre com o cruzamento disperso. A grande diferença é que o segundo indivíduo é gerado da maneira oposta ao primeiro, ou seja, os bits 0 da máscara transferem os bits do pai “1”, enquanto os bits 1 da máscara transferem os bits do pai “2”.

No caso presente foi utilizado o cruzamento em 1 ponto, sendo que a recombinação é realizada entre os indivíduos da 1ª metade da população com os indivíduos da segunda metade. A figura a seguir exemplifica o método de recombinação genética entre os indivíduos.

Figura 12 - Recombinação genética - Cruzamento em 1 ponto

Fonte: [17]

O fluxograma apresentado na Figura 13a seguir ilustra a rotina para a aplicação do operador de cruzamento.

Figura 13 - Fluxograma do cruzamento

Fonte: [17]

4.2.2.8 Mutação

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, o que fornece meios para introdução de novos elementos na população.

Desta maneira a mutação assegura que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois este mecanismo altera levemente a direção da busca.

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação que comumente varia de 0,1 a 10%. Uma baixa taxa de mutação previne que a busca fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca, além disso, possibilita que qualquer ponto do espaço de busca seja atingido. A atribuição de altas taxas de mutação torna a busca aleatória.

Uma alternativa para diminuir a pressão de convergência e aumentar o número de alternativas exploradas é evitar a repetição de indivíduos na mesma geração ou até entre todas as gerações.

No modelo implementado para este projeto foi utilizada a última alternativa, ou seja, o AG não permite que indivíduos apareçam repetidamente no histórico (com exceção ao indivíduo do Elitismo que é passado diretamente de uma geração a outra), sendo que quando é encontrado um indivíduo que já apareceu no histórico (após a atuação dos operadores de seleção, cruzamento e mutação) é aplicado sobre este o operador de mutação até que o mesmo se torne inédito.

Figura 14 - Operador Mutação

1	0	0	1	1	1
1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	1	0
1	2	3	4	5	6

Fonte: [17]

5 APLICAÇÃO DA MODELAGEM DESENVOLVIDA PARA A ANÁLISE DE PORTFÓLIO DE FONTES RENOVÁVEIS

5.1 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS – CONTRATAÇÃO ÓTIMA

Na ótica empresarial, a complementaridade existente entre fontes incentivadas de produção sazonal, pode ser utilizada para permitir aos agentes maximizar sua receita esperada, sob condicionamento de critérios de risco pré-fixados. Diante desta “máxima” e com o objetivo de avaliar e quantificar a sinergia entre energia eólica e da biomassa, que tem perfil de produção complementar às PCH's, foram realizadas simulações para identificar a melhor estratégia de contratação de energia, a fim de buscar a máxima receita líquida possível, atendendo a determinadas restrições de risco específicas, conforme descrito a seguir.

As situações comparadas consideram (i) um agente incentivado atuando comercialmente isolado e (ii) mais de um agente incentivado atuando comercialmente de forma conjunta (portfólio de plantas de um único agente gerador), de modo a perseguir a vantagem da produção sazonal complementar, em que os agentes proporcionam hedge entre si. Nessa situação, torna-se possível maximizar a receita do conjunto, sem infração aos critérios de risco, obtendo ganhos em relação à soma das receitas dos agentes quando considerados atuando isoladamente.

Nessa perspectiva, a primeira parte deste capítulo trata dos estudos feitos com a ferramenta desenvolvida. Ao todo foram realizados seis estudos de três formas diferentes (pareados dois a dois): primeiro relativo a variação no preço de venda; segundo, avaliando diferentes perfis de vento (um mais favorável que o outro); terceiro, utilizando as usinas do PROINFA e as usinas de Leilão de Energia.

Na simulação do despacho, para as usinas eólicas, como padrão de sazonalização, foi adotado o submercado Nordeste (Figura 15). Foram utilizadas as usinas eólicas do PROINFA para os três primeiros perfis sendo que para o 1º perfil foi utilizada a média da geração registrada nos de 2009 e 2010, para 2º perfil foi utilizada os anos de 2011 a 2013 e para o 3º perfil somente o ano de 2013.

O quarto e último perfil foram utilizados as usinas eólicas do Nordeste também, porém dos Leilões de Energia promovidos pelo governo e realizados pela CCEE. Neste perfil a média de geração utilizada foi a do ano de 2013.

Nestes casos, está se admitindo a usina eólica com produção sazonal, porém “determinística”, não considerando nessa análise o comportamento estocástico da geração, decorrente da aleatoriedade do valor do vento. Enfatiza-se que é exatamente o formato que a geração eólica é representada nos modelos setoriais de despacho e formação de preço. A aleatoriedade da geração eólica tem sido estudada por diversos autores [17], [22], [23], [24], [25], [26] e [27].

Figura 15 - Perfil de sazonalização de geração eólica

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste estudo, para as usinas térmicas a biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, no período de safra foi adotada a ocorrência de geração, que coincide com o período seco. Neste período (meses de maio a novembro) as usinas têm Despacho Mínimo Obrigatório (DMO) de 20% da placa e Despacho Máximo possível de 90% da placa, com custo variável de geração de R\$25, correspondente ao custo de oportunidade do bagaço (custo de combustível) somado ao custo de Operação e Manutenção variável. Finalizando as características de despacho, as usinas hidrelétricas (supostamente PCHs) têm sua curva de geração determinada pelo MRE.

Quanto aos critérios de risco, nos seis primeiros estudos de caso, analisando os valores anuais de todas as séries, foi considerada em apenas 5% das séries que a receita estivesse abaixo de 80% de uma receita de referência constituída pela receita de contratos de longo prazo para contratação de 100% da Garantia Física e em 10% das séries, que a receita estivesse entre 80 e 85% da mesma receita de referência.

5.2 ANÁLISE DE CONTRATAÇÃO ÓTIMA PARA UM PORTFÓLIO PRÉ-DETERMINADO

5.2.1 Estudo de Caso 1 – PROINFA Nordeste 2009 e 2010

Neste estudo foram introduzidos três blocos de geração, nas modalidades Eólica, Hidrelétrica (PCH) e Térmica (Biomassa), com igual potência instalada.

A energia do conjunto, para efeito de contratação bilateral, foi precificada no patamar de R\$ 130,00/MWh e o perfil do contrato definido como “flat”. Segue na tabela abaixo as características do caso e, nas próximas figuras, os gráficos de Receita e Risco que resultaram da variação de contratação, e a tabela resumo, com o resultado da otimização quando simulados individualmente ou em agrupados.

Pretende-se com tais dados de entrada, analisar possível complementaridade entre as formas de geração, que pode se manifestar pela maior receita quando combinadas as usinas no portfólio, ou pelo menor risco.

Tabela 1 - Projetos possíveis para composição do Portfólio – Caso 1

Preço de Contrato: R\$ 130/ MWh - FLAT			
	Usina Eólica	Hidrelétrica (PCH)	Termelétrica (Biomassa)
Potência	30 MW	30 MW	30 MW
Garantia Física	6,74 MWmed	19,5 MWmed	15,75 MWmed
Perfil	“PROINFA 09a10”	MRE	“Biomassa”

Figura 16: Receita/Risco x Contratação - PROINFA Nordeste 2009 e 2010, Caso 1. Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C).

Figura 17: Receita/Risco x Contratação - PROINFA Nordeste 2009 e 2010, Caso 1. Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Tabela 2 - Resumo dos resultados – PROINFA Nordeste 2009 e 2010, Caso 1. Eólica (A), PCH (B), Biomassa (C), Eólica+PCH (D), Eólica+Biomassa (E), PCH+Biomassa (F) e Eólica+PCH+Biomassa (G).

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	83,00	39.518.623,11	39.518.623,11	-	0,29	6,57
B	78,00	106.349.005,06	106.349.005,06	-	1,43	9,43
C	77,87	-	-	-	9,14	9,14
D	79,00	145.902.772,83	145.867.628,17	35.144,66	-	9,71
E	96,98	135.990.508,09	39.518.623,11	96.471.884,98	4,86	3,14
F	79,00	204.506.900,03	106.349.005,06	98.157.894,96	1,71	9,14
G	80,00	243.954.751,70	145.867.628,17	98.087.123,53	1,43	9,43

Quando comercializando energia isoladamente, as usinas Eólica e PCH somaram R\$ 145.867.628,17 de receita no período de cinco anos. Porém quando comercializando em um mesmo portfólio, obteve-se a receita de R\$ 145.902.772,83, um valor superior ao primeiro caso em R\$ 35.144,66. Observando-se as figuras 16-(A), 16-(B) e 17-(A), nota-se que o aumento foi em função da diminuição do risco, que permitiu reduzir o montante alocado em contrato, caracterizando “hedge” entre os empreendimentos.

No caso da biomassa, não foi possível, com as características impostas, atender as condições de risco (tabela 2). Porém, uma vez em combinação com a PCH ou a Eólica, ou com ambas (PCH e eólica), pôde-se viabilizar o conjunto, ou seja, houve um ganho de receita devido à complementaridade correspondente à diferença entre a receita do conjunto e a receita da PCH vendida isoladamente, somada à receita da Biomassa com mínima exposição ao risco (já que a receita da Biomassa vendida isoladamente não atende aos critérios de risco fixados e assume-se o risco do empreendedor posicionando a contratação no ponto de risco mínimo, embora acima do critério).

Utilizando o caso da PCH como paradigma de análise do comportamento das curvas de receita e risco, convém sublinhar que quando operando comercialmente isolada, a melhor estratégia de contratação, para contratos de perfil “flat”, indica que é necessário alocar 78% em contratos.

Na Figura 16-(B), podemos observar que, se não houvesse a limitação de risco financeiro, a maximização de receita seria obtida com a venda de 100% do lastro físico da PCH no mercado spot. A expectativa de Receita Total maximizada a ser obtida no período de cinco anos será de R\$ 106.349.005,06. Destaca-se que o resultado aparentemente inusitado, pode ser explicado ao considerar o cenário simulado, na qual a média de longo termo do PLD é superior ao preço de contrato, de tal forma que no longo prazo a receita comercializada apenas no mercado de curto prazo superaria a receita via contrato de longo prazo (a reta de expectativa de receita é decrescente com o nível de contratação). Não obstante, quando o conceito de risco é considerado, contratações em níveis muito baixos não são permitidas pelo modelo, posto que isso implicasse em risco significativo de longos períodos com receita reduzida, ou seja, nos períodos em que o PLD está baixo.

Outra informação obtida da simulação, é de a melhor estratégia identificada para atendimento às restrições, apresentadas no início dessa seção, e ao mesmo tempo maximizar a receita, é disponibilizar 78% da garantia física da PCH sob contrato e disponibilizar o restante para ser vendido ao preço spot. Na Figura 16-PCH, podemos observar que a redução do percentual de contratação, buscando melhorar a expectativa de receita, implica em violar a restrição de receita mínima entre 80% e 85% da receita de referência. Nesse caso, a maximização da receita, sem considerar critérios de risco, seria obtida comercializando a planta como “Merchant” (isto é, toda a Garantia Física alocada no mercado de curto prazo), porque o preço de contrato assumido é inferior à média do PLD, considerando todas as séries hidrológicas e anos do horizonte de análise.

Vale frisar que quando se introduz critérios de risco, a alocação integral no mercado spot, embora na média maximize a expectativa de receita, contempla situações de receitas muito reduzidas em longos períodos em que o PLD é baixo, característica de períodos hidrológicos favoráveis longos. Aliás, no sistema brasileiro, em 95 % do tempo as vazões são favoráveis e o PLD atinge valores extremos em curtos períodos (como no início de 2008, por exemplo). Já em 2014, foi um ano atípico pela ocorrência de hidrologia extremamente desfavorável com consequências para o PLD atingindo o valor teto por três meses consecutivos (fevereiro a abril).

Nos outros casos estudados neste trabalho, a análise seguiu a mesma linha de raciocínio deste, portanto não será neste momento detalhada.

5.2.2 Estudo de Caso 2 – PROINFA Nordeste 2009 e 2010 - Preço de Venda

Dando seguimento, pretende-se analisar a influência do preço de venda da energia na Receita e no Risco x Contratação.

Os blocos foram inseridos da mesma forma que no Estudo de Caso 1, porém com a energia precificada a R\$ 145,00/MWh.

Considerando a média de PLD nas séries utilizadas de R\$ 140,66/MWh, espera-se que os resultados caminhem para uma maior contratação, pois na média, sem ponderar os riscos de comercialização, torna-se mais interessante vender a energia a preço de contrato do que ficar exposto ao mercado “spot”.

Figura 188: Receita/Risco x Contratação - PROINFA Nordeste 2009 e 2010 - Preço venda, Caso 2. Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C).

Figura 199 - Receita/Risco x Contratação – PROINFA Nordeste 2009 e 2010 - Preço venda, Caso 2. EOL+PCH– Caso 2. Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Utilizado a ferramenta “Solver”, do software Microsoft Excel chega-se às porcentagens ótimas de contratação, que são mostradas na tabela a seguir.

Tabela 3 - Resumo dos resultados - PROINFA Nordeste 2009 e 2010 - Preço venda, Caso 2. Eólica (A), PCH (B), Biomassa (C), Eólica+PCH (D), Eólica+Biomassa (E), PCH+Biomassa (F) e Eólica+PCH+Biomassa (G).

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	88,21	43.259.802,04	43.259.802,04	-	0,29	3,43
B	87,27	116.678.355,90	116.678.355,90	-	2,57	0,29
C	87,27	-	-	-	6,86	2,29
D	88,08	159.965.949,51	159.938.157,94	27.791,57	1,43	-
E	88,06	149.947.778,76	43.259.802,04	106.687.976,72	4,86	3,43
F	84,30	223.150.627,86	116.678.355,90	106.472.271,96	1,43	2,29
G	85,13	266.425.599,57	159.938.157,94	106.487.441,63	0,86	2,57

Apesar da complementação, quando associadas EOL e PCH, o resultado é menor do que no Estudo de Caso 1, deste trabalho. Porém, com relação à contratação, o valor foi maior que os resultados do Estudo de Caso 1 (Tab. 2), em boa parte dos casos resultaram em 88%.

Voltando à análise da PCH operando comercialmente isolada, verifica-se que embora a receita pudesse ser aumentada elevando-se o nível de contratação, os riscos de exposição ao mercado spot em períodos secos prolongados, em que o PLD atinge os maiores valores, por vezes atingindo o teto, justo nos meses em que a energia alocada à PCH é muito reduzida, tornaria muito arriscada essa estratégia, face aos montantes que deveriam ser desembolsados para pagar as exposições no mercado de curto prazo.

5.2.3 Estudo de Caso 3– PROINFA Nordeste 2011 e 2013

Com o objetivo de avaliar o impacto de um perfil de geração eólica mais favorável que o do Estudo de Caso 1, mantendo o foco na Receita e no Risco x Contratação, utilizamos tal estudo como base, porém com perfis baseados na média da geração das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste dos anos de 2011 a 2013, a saber.

Tabela 4 - Composição do Portfólio – Caso 3

Preço de Contrato: R\$130/MWh - FLAT			
	Usina Eólica	Hidrelétrica (PCH)	Termelétrica (Biomassa)
Potência	30 MW	30 MW	30 MW
Garantia Física	10,65MWmed	19,5 MWmed	15,75 MWmed
Perfil	“PROINFA 11a13”	MRE	“Biomassa”

Figura 20: Receita/Risco x Contratação - PROINFA Nordeste 2011 e 2013, Caso 2. Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C).

Figura 220 - Receita/Risco x Contratação – PROINFA Nordeste 2011 e 2013, Caso 3. EOL+PCH– Caso 3. Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Tabela 5 - Resumo dos resultados Caso 3

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	80,91	62.847.089,74	62.847.089,74	-	-	10,00
B	78,00	106.349.005,06	106.349.005,06	-	1,43	9,43
C	78,00	-	-	-	9,14	9,14
D	79,00	169.200.034,17	169.196.094,80	3.939,37	-	8,86
E	79,11	161.178.461,94	62.847.089,74	98.331.372,20	4,57	10,00
F	79,00	204.506.900,03	106.349.005,06	98.157.894,96	1,71	9,14
G	80,00	267.233.616,65	169.196.094,80	98.037.521,85	0,86	9,43

No caso simulado observa-se que o risco da Receita abaixo de 80% diminuiu quando comparados ao estudo de caso 1 – tabela 2 nas combinações em que a Eólica esteve presente. O risco menor advém da geração das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste para os anos de 2011 a 2013 possuir uma condição de vento melhor do que a dos anos de 2009 e 2010.

No caso da Eólica um ponto a destacar é o aumento da expectativa da receita devido ao fator de capacidade do perfil utilizado no estudo de caso. A condição de vento proporcionada nos anos de 2011 a 2013 esteve mais favorável do que nos anos 2009 e 2010.

5.2.4 Estudo de Caso 4 – PROINFA Nordeste 2011 e 2013 - Preço de Venda

Com o objetivo de avaliar o impacto de um perfil de geração eólica mais favorável que o obtido no Estudo de Caso 1, além do preço de venda a R\$/MWh 145 com foco na Receita e no Risco x Contratação, utilizamos o Estudo de Caso 2 como base, porém com perfis baseados na média da geração das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste dos anos de 2011 a 2013, a saber.

Tabela 6 - Composição do Portfólio – Caso 4

Preço de Contrato: R\$145/MWh - FLAT			
	Usina Eólica	Hidrelétrica (PCH)	Termelétrica (Biomassa)
Potência	30 MW	30 MW	30 MW
Garantia Física	10,65MWmed	19,5 MWmed	15,75 MWmed
Perfil	“PROINFA 11a13”	MRE	“Biomassa”

Figura 21 – Receita e Risco x Contratação – Caso 4Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C)

Figura 22 - Receita e Risco x Contratação – Caso 4 - Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Tabela 7 - Resumo dos resultados - PROINFA Nordeste 2011 e 2013 – preço venda, Caso 4. Eólica(A), PCH (B), Biomassa (C), Eólica+PCH (D), Eólica+Biomassa (E), PCH+Biomassa (F) e Eólica+PCH+Biomassa (G).

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	89,43	68.675.645,67	68.675.645,67	-	-	0,57
B	87,27	116.678.355,90	116.678.355,90	-	2,57	0,29
C	87,27	-	-	-	6,86	2,29
D	89,24	185.421.608,00	185.354.001,57	67.606,43	1,43	-
E	83,39	175.108.965,75	68.675.645,67	106.433.320,08	3,71	4,29
F	84,30	223.150.627,86	116.678.355,90	106.472.271,96	1,43	2,29
G	86,26	291.891.490,09	185.354.001,57	106.537.488,52	0,29	2,00

No caso da eólica, quando analisado sob a ótica do preço de venda, a receita aumentou de R\$ 62.847.089,74 para R\$ 68.675.645,67 do estudo de caso 3 para este. Do ponto de vista da melhora da condição de vento apresentada entre os anos 2011 a 2013 os a receita aumentou de R\$ 43.259.802,04 para os mesmos R\$ 68.675.645,67 do estudo de caso 2 para este.

No caso simulado cabe destacar que o risco da Receita abaixo dos dois critérios de risco diminuiu quando comparados ao estudo de caso 2 – tabela 4 nas combinações em que a Eólica esteve presente. O risco menor advém da geração das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste para os anos de 2011 a 2013, pois possuem uma condição de vento melhor do que a dos anos de 2009 e 2010.

5.2.5 Estudo de Caso 5 – PROINFA Nordeste 2013

Este caso de estudo e o próximo, estudo de caso 6, utilizaram os perfis formados pela média da geração das usinas eólicas no Nordeste do ano de 2013, a saber.

Tabela 8 - Composição do Portfólio – Caso 5

Preço de Contrato: R\$145/MWh - FLAT			
	Usina Eólica	Hidrelétrica (PCH)	Termelétrica (Biomassa)
Potência	30 MW	30 MW	30 MW
Garantia Física	10,65MWmed	19,5 MWmed	15,75 MWmed
Perfil	“PROINFA 13”	MRE	“Biomassa”

Especificamente para este caso foram usadas as usinas eólicas do PROINFA no Nordeste. Pretende-se analisar este caso junto ao próximo estudo de caso.

Tabela 9 - Resumo dos resultados - PROINFA Nordeste 2013, Caso 5. Eólica(A), PCH (B), Biomassa (C), Eólica+PCH (D), Eólica+Biomassa (E), PCH+Biomassa (F) e Eólica+PCH+Biomassa (G).

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	92,49	67.977.408,96	67.977.408,96	-	-	-
B	87,27	116.678.355,90	116.678.355,90	-	2,57	0,29
C	87,27	-	-	-	6,86	2,29
D	89,77	184.692.397,51	184.655.764,86	36.632,65	1,43	-
E	83,07	174.334.287,28	67.977.408,96	106.356.878,32	3,14	5,14
F	84,30	223.150.627,86	116.678.355,90	106.472.271,96	1,43	2,29
G	86,89	291.186.757,37	184.655.764,86	106.530.992,51	-	2,00

No caso simulado o risco de receita abaixo de 80% da receita de referência ou entre 80% e 85% da receita de referência é a menor para a Eólica simulada individualmente ou para as três fontes no portfólio.

5.2.6 Estudo de Caso 6 – LEILÃO Nordeste 2013

Este caso de estudo utilizou o perfil formado pela média da geração das usinas eólicas no Nordeste do ano de 2013, a saber.

Tabela 10 - Composição do Portfólio – Caso 6

Preço de Contrato: R\$145/MWh - FLAT			
	Usina Eólica	Hidrelétrica (PCH)	Termelétrica (Biomassa)
Potência	30 MW	30 MW	30 MW
Garantia Física	11,83MWmed	19,5 MWmed	15,75 MWmed
Perfil	“LEILÃO13”	MRE	“Biomassa”

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 - Receita/Risco x Contratação –Caso 5 - Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C)

Figura 24 - Receita/Risco x Contratação– Caso 5 - Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Especificamente para este caso foram usadas as usinas eólicas do LEILÃO no Nordeste. Pretende-se analisar o impacto neste caso das diferentes tecnologias empregadas nas usinas eólicas do PROINFA e as do LEILÃO com o foco na Receita e no Risco x Contratação. É sabido que as usinas eólicas do PROINFA possuem de equipamentos como altura de torre, potência dos aerogeradores e outras características, inferiores as usinas de LEILÃO.

Figura 25 - Receita/Risco x Contratação – Caso 6 - Eólica (A), PCH (B) e Biomassa (C).

Figura 26 - Receita/Risco x Contratação – Caso 6 - Eólica+PCH (A), Eólica+Biomassa (B), PCH+Biomassa (C) e Eólica+PCH+Biomassa (D).

Tabela 11 - Resumo dos resultados - LEILÃO Nordeste 2013, Caso 6. Eólica(A), PCH (B), Biomassa (C), Eólica+PCH (D), Eólica+Biomassa (E), PCH+Biomassa (F) e Eólica+PCH+Biomassa (G).

Usinas	Contratação Ótima (%)	Receita Ótima		Hedge (R\$)	Receita (< 80%)	Receita (80- 85%)
		Operação Conjunta (R\$)	Operação Isolada (R\$)			
A	93,13	75.506.429,92	75.506.429,92	-	-	-
B	87,27	116.678.355,90	116.678.355,90	-	2,57	0,29
C	87,27	-	-	-	6,86	2,29
D	89,54	192.188.177,12	192.184.785,82	3.391,30	1,43	-
E	83,40	181.845.533,17	75.506.429,92	106.339.103,25	2,86	4,86
F	84,30	223.150.627,86	116.678.355,90	106.472.271,96	1,43	2,29
G	86,85	298.686.125,11	192.184.785,82	106.501.339,29	-	1,71

A usina eólica notadamente apresenta uma garantia física superior ao estudo de caso anterior de 10,65 MWmed para 11,83 MWmed para um parque eólica de capacidade de 30 MW. Com isso receita aumenta de R\$ 67.977.408,96 para R\$ 75.506.429,92 do estudo de caso 5 para o 6.

Para os conjuntos Eólica+Biomassa+PCH e Biomassa+Eólica os riscos de receita esperada acima dos critérios adotados na pesquisa reduziram, que pode determinar maior segurança aos proprietários dos empreendimentos.

5.3 FORMAÇÃO DE PORTFÓLIO ÓTIMO DE RENOVÁVEIS COM RESTRIÇÕES DE RISCO DE MERCADO E TETO DE INVESTIMENTO

5.4 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS – PORTFÓLIO ÓTIMO

Analisando os resultados dos Leilões de Energia Nova ou de Reserva observa-se que o custo de investimento unitário tem sido o fator decisivo para inserção das fontes alternativas na matriz energética brasileira. Diante deste fato, os estudos de caso de portfólio ótimo focaram em avaliar o risco de uma possível insuficiência de receita para honrar os compromissos variando o parâmetro custo de investimento.

Para fins didáticos, o primeiro estudo de caso teve o custo de investimento igual para as usinas do portfólio. No segundo estudo de caso, apenas a usina eólica teve um custo de investimento diferente em relação as outras fontes alternativas.

O custo da usina eólica foi menor que as outras fontes alternativas. E por último foram utilizados custos de investimentos diferentes para cada fonte. Neste estudo de caso a usina eólica e a PCH apresentam o menor e o maior custo, respectivamente. Os projetos de investimentos das usinas eólicas, PCH e biomassa tiveram uma vida útil (nu^{fonte}) ou prazo do contrato de 25, 30 e 20 anos, respectivamente.

Tabela 12: Vida útil do empreendimento/prazo do contrato e Fator de Capacidade

Usina	PCH	Biomassa	Eólica
Vida útil	30 anos	20 anos	25 anos
Fator de Capacidade	0,60	0,53	0,45

O perfil de geração da usina eólica foi dado pelo fator de capacidade mensal ($FC_{a,m,s}^{EOL}$) com ventos predominantes no período seco do Nordeste. Já para a usina biomassa o perfil de geração (D_m^{Bio}) foi estimado com base na safra da cana de açúcar do Sudeste que abrange os meses de maio a novembro. Para a PCH, o perfil de geração se deu seguindo a curva do MRE ($f_{a,m,s}^{MRE}$). No modelo aqui proposto, foram adotados esses perfis determinístico de geração para todos os anos igualmente.

Figura 27- Perfil Eólico: Fator de Capacidade x Meses.

Figura 28- Perfil Biomassa: Fator de Disponibilidade x Meses.

O cronograma de desembolso para fins de investimento nos empreendimentos Eólicos, PCH e Biomassa utilizada nas simulações de portfólio ótimo estão apresentadas a seguir:

Tabela 13 - Cronograma de Desembolso de Capital.

Usina	Vida útil (anos)	Cronograma de Desembolso de Capital (%)					
		A-5	A-4	A-3	A-2	A-1	Total
Eólica	25	00,0	00,0	50,0	25,0	25,0	100,0
PCH	30	00,0	37,5	12,5	25,0	25,0	100,0
Biomassa	20	00,0	00,0	00,0	75,0	25,0	100,0

5.4.1 Estudo de Caso 7 – CASO BASE

O caso base utilizou investimento (I_{max}) de R\$240MM destinados a compor o portfólio considerando uma taxa mínima de atratividade (i) de 10% a.a. e um CVaR Limite da Receita Anual ($CVaR_{RT, Limite}$) de R\$33,5MM (80% da Receita de Referência) com um preço de venda de contrato a R\$140,00/MWh com perfil “flat”.

Para fins didáticos, os custos de investimento unitário (CI^{fonte}) (R\$/kW instalado) de cada fonte incentivada para este caso (base) foram considerados iguais a R\$4.000/kW.

A partir desses dados, foi executado o modelo variando o CVaR Limite da Receita Anual de R\$33,5MM a R\$37,5MM com um passo de R\$0,5MM, conforme abscissa do gráfico abaixo.

Figura 29 – Portfólio Ótimo, Parcela da Garantia Física Contratada x Limite do CVaR da Receita Anual

O gráfico anterior mostra a composição do portfólio ótimo das fontes incentivadas (Eólica, PCH e Biomassa) conforme se aumenta o CVaR Limite da Receita Anual. Embora não tenha sido limitada a potência total do portfólio, a soma é sempre próxima a 60MW, devido a este valor ser a razão do investimento total de R\$240MM pelo custo de investimento de R\$4.000/kW. A fonte predominante é a PCH devido a seu fator de capacidade ser de 60% e os outros de 53% e 45%, respectivamente, biomassa e eólica.

O gráfico também mostrou que mesmo com uma redução da contratação da garantia física houve uma adição maior de biomassa, a fim de atingir a restrição imposta pelo CVaR Limite da Receita Anual no intervalo de R\$33,5MM a R\$36MM.

Nos próximos dois gráficos podem ser observados a resposta do modelo conforme se aumenta o CVaR Limite da Receita Anual foi de busca do atendimento a essa restrição.

Tanto o CVaR do VPL ($CVaR_{VPL}(5\%)$) como o da Receita Anual ($CVaR_{RT}(5\%)$) aumenta quando se aumenta a restrição. Já o valor esperado do VPL diminui e a receita Anual Média ficou entre R\$42MM e R\$44MM.

Outro aspecto do gráfico é o comportamento “espelho” das potências ótimas da PCH e Biomassa. A ordenada de valor 30MW representa o “espelho” das curvas das potências ótimas da PCH e Biomassa.

Dentro do intervalo do CVaR Limite da Receita Anual simulado para este caso, foi atendida em pelo menos 80% da Receita Anual Média simulada. Isto quer dizer que em 5% dos casos simulados, o valor da Receita Anual Média ficaria abaixo dos 80%. A partir da metade do intervalo simulado do CVaR Limite da Receita Anual, a receita atendida é de ao menos 85%.

Figura 30 – Potencia Ótima e VPL (CVaR e Média) x Limite do CVaR da Receita Anual

Figura 31 – Potencia Ótima e Receita Anual (CVaR e Média) x Limite do CVaR da Receita Anual

Figura 32 – Potencia Ótima e CVaR/Média Receita Anual x Limite do CVaR da Receita Anual

Para os estudos de caso de Portfólio Ótimo, a Receita Anual tem um nível de confiança de 95%. Não obstante, será observado menor risco de perda de Receita quando o CVaR da Receita Anual apresentar uma elevação. E a relação inversa apresenta um risco maior, devido a Receita Anual não atingir uma determinada Receita de Referência exigida, ou seja, o CVaR ficar abaixo de um determinado percentual da Receita Referência. Esse conceito é importante para a discussão destes estudos de casos de portfólio ótimo.

As fontes de geração foram selecionadas de acordo com a ordem de mérito de custo unitário de investimento (R\$/kW), ou seja, a lógica econômica foi observada, priorizando as fontes de menor custo para a maior somente sendo limitada pelo investimento total. A menos, no caso em que os custos foram iguais, de modo que o maior fator de capacidade das fontes foi o que preponderou.

5.4.2 Estudo de Caso 8 – EÓLICA MAIS EM CONTA

Para este caso, foi adotada uma estrutura de custo de investimento de R\$3.500/kW para a eólica enquanto que para as outras fontes foi de R\$4.500/kW. Este custo para a fonte eólica foi proposital de modo que essa fonte pudesse entrar na composição do portfólio ótimo, conforme gráfico abaixo. O investimento total adotado neste caso foi de R\$100MM.

Semelhante ao caso anterior, embora não tenha se restringido a potência total do portfólio, a soma das potências das fontes é cerca de 25MW devido a relação do investimento total pela média dos custos de investimento de cada fonte. Neste caso, as fontes que compõem o portfólio nos casos simulados é a Eólica e a PCH sendo a média dos custos de investimento R\$4.000/kW. Como o investimento total é R\$100MM e a média dos custos é R\$4.000/kW então a potência total do portfólio será de 25MW.

Conforme se aumenta o CVaR Limite da Receita Anual para o intervalo de R\$13,5MM a R\$14,5MM ao passo de R\$250.000,00, o percentual de contratação varia de 94% a 99%.

Figura 33 – Portfólio Ótimo, Parcela da Garantia Física Contratada x Limite do CVaR da Receita Anual.

O eixo do “espelho” para este caso em que o comportamento das fontes Eólica e PCH formam o portfólio ótimo está no valor da ordenada de 12,5MW da potência ótima, conforme os próximos dois gráficos.

Nos resultados deste caso houve um “ponto de inversão” em que a predominância da PCH era até este ponto e depois a fonte eólica é a dominante. E partir deste ponto o valor esperado do VPL e a Receita Anual Média começam a diminuir mesmo com o aumento dos seus CVaR.

A partir do ponto de inversão (no valor de R\$ 13.750.000,00 do Limite do CVaR), o percentual da Receita Anual Média se eleva, conforme aumenta a potência da fonte eólica (gráfico abaixo). Ou seja, 95% das séries, para este intervalo de CVaR Limite, obtiveram uma Receita Anual acima de 85% da referência. De outra forma, existem 5% dos casos em que o valor de Receita Anual pode ser maior que 15% da média.

Figura 34 – Potencia Ótima e VPL (CVaR e Média) x Limite do CVaR da Receita Anual.

Figura 35– Potencia Ótima e Receita Anual (CVaR e Média) x Limite do CVaR da Receita Anual

Figura 36 – Potência Ótima e CVaR/Média Receita Anual x Limite do CVaR da Receita Anual

De outro modo, no estudo de caso 7, novamente o maior fator de capacidade das fontes foi determinante para compor o portfólio com a Eólica uma vez que os custos da PCH e Biomassa eram iguais.

Outro ponto a ser discutido é o fato de quanto maior o CVaR da Receita Anual menor a chance de se auferir perdas potenciais. Por isso os estudos de casos tiveram sistematicamente o Limite do CVaR da Receita Anual elevados. A busca de uma solução mostrou no estudo de caso 2 um aumento da participação da Eólica em detrimento da PCH.

5.4.3 Estudo de Caso 9 – L.E.N. A-3 E L.E.R. DE 2013

De modo a ilustrar esta pesquisa com casos aderentes a atualidade do mercado de energia, foram utilizados os custos de investimento unitário (R\$/kW instalado) de cada fonte incentivada dos resultados do 5º Leilão de energia de reserva – LER para a usina eólica e o 16º LEN para as usinas a biomassa e PCH.

O custo de investimento unitário (R\$/kW instalado) de cada fonte incentivada foi estimado com base nas informações dos Leilões de Energia Nova e de Reserva disponibilizadas pela CCEE.

Tabela 14– Custo de investimento por fonte

Usina	PCH	Biomassa	Eólica
Custo de Investimento	R\$5.300/kW	R\$4.500/kW	R\$3.600/kW

O modelo apresentou a diversificação do portfólio e não violou nenhuma restrição (VaR e CVaR) mesmo aumentando o risco (CVaR). A figura a seguir mostra que para uma restrição de CVaR de R\$26MM a parcela de eólica 65 MW e biomassa é de cerca 1 MW. Por sua vez o CVaR de R\$27MM apresentou um aumento na participação da biomassa para cerca de 3 MW e para o CVaR de R\$28MM a participação da biomassa aumentou para 8,5 MW. Para valores de CVaR acima desse limite até R\$31MM houve uma saturação de uma maior participação da biomassa no portfólio e partir disso o modelo começou a reduzir o percentual de garantia física contratada de modo a capturar um risco de PLD elevado que permitisse não violar a restrição de receita anual.

Figura 37 – Portfólio Ótimo, Parcela da Garantia Física Contratada x Limite do CVaR da Receita Anual

Figura 38 – Potencia Ótima e VPL (CVaR e Média) x Limite do CVaR da Receita Anual

A condição de contorno deste teste mostra um CVaR calculado pelo modelo (linha verde) atingindo no máximo R\$31MM cerca de 85% da receita de referência. Caso se exige um CVaR maior que 85% da receita de referência não seria possível atingir a não ser que as condições de mercado ou do investidor fossem alteradas.

Figura 39- Receita/Risco x Contratação

No caso de estudo 8 as fontes eólica e biomassa compuseram o portfólio de geração com o aumento do Limite do CVaR da Receita Anual até um determinado valor. Após isso a Biomassa um aumento de sua potência não reduzia o risco, ou seja, não aumentava o CVaR.

Neste caso, a PCH não foi inserida no portfólio devido ao seu custo ser muito dispare em relação às outras duas fontes, cumprindo ressaltar que estes custos apresentam a realidade do mercado de energia.

5.4.4 Estudo de Caso 10 – PERFORMANCE DO A.G.

Foi realizado um teste em que se avaliou a performance de uma simulação com 120 iterações sendo que o parâmetro adotado nas simulações foi de 60 iterações.

Os resultados do modelo apresentam-se estáveis a partir de iteração (geração) 60. Conforme a figura abaixo a receita máxima (linha vermelha) e a receita média (linha verde) de cada iteração é mostrada em relação a sua avaliação (receita máxima e receita média), ou seja, a avaliação é a receita descontadas as penalizações caso alguma restrição seja violada pelo modelo. Foi traçada uma linha de tendência linear da avaliação da receita média (roxa tracejada) e mostrou-se com pouco crescimento mesmo após 120 iterações.

As composições da carteira e do percentual de contratação apresentam-se estáveis após a iteração 60. Após a iteração 60 a composição da carteira (gráfico de área) e o nível de contratação (linha roxa) apresentam uma estabilidade de resultado até a iteração 120. Mesmo com a introdução de indivíduos mutantes o resultado em cerca de 60 gerações foi o mesmo.

Figura 40 – Evolução da Performance do A.G.

Figura 41 – Melhor Configuração de Portfólio em cada Geração.

6 CONCLUSÃO

A dinâmica e a incerteza do Mercado de Energia de hoje exigem procedimentos de avaliação baseados em portfólio, que permitem acomodar o risco de mercado e enfatizando a conveniência da diversificação das fontes de geração. A otimização do portfólio reflete a inter-relação dos comportamentos de geração entre as fontes alternativas. Embora fundamental para estimar corretamente o risco do portfólio, os modelos de avaliação energética geralmente ignoram essa relação estatística fundamental e, podem recorrer a técnicas não tão bem adaptadas para lidar com o risco. Algumas técnicas não podem replicar aspectos importantes de inter-relações das fontes de geração e afetam drasticamente os riscos estimados do portfólio, portanto, não são substitutos para abordagens baseadas em portfólio.

Quanto aos aspectos de metodologia, cumpre salientar que a Teoria de Portfólio é amplamente difundida no mercado financeiro sendo muito utilizada até os dias atuais. A teoria oferece soluções que aumentam a diversidade energética e, portanto, são mais robustos do que inserir aleatoriamente no portfólio outras tecnologias. Ela também oferece mais embasamento teórico na implementação de estratégias de mitigação de riscos de mercado, que às vezes as análises de sensibilidade são adotadas erroneamente.

Resultados do Estudo de Casos

Uma primeira consideração sobre a metodologia aplicada nesta pesquisa é sobre o problema de Contratação Ótima pertencer a um subconjunto de problemas do Portfólio Ótimo. No conjunto de problemas de Portfólio Ótimo respeitando as restrições de risco e investimento, a busca do A.G. pela solução ótima expõe combinar o portfólio de tal maneira, que se possa ter o melhor indivíduo possível avaliado de geração em geração. Uma das características que o indivíduo possui é o percentual de Garantia Física contratado além das potências a serem alocados no processo de busca.

De modo particular, o problema de Contratação Ótima tem como dado, as potências de cada fonte de geração, assim como sua Garantia Física, de modo que a busca pela solução ótima perpassa pela alocação da mesma objetivando a melhor avaliação possível.

Os estudos de casos da contratação ótima mostraram que a Biomassa só se viabiliza respeitando os critérios de risco adotados na pesquisa, quando considerado em conjunto com a Eólica ou a PCH.

Outro resultado relevante, observado nos estudos de casos de contratação ótima, foi a diminuição de risco do conjunto PCH e Biomassa quando se introduz a Eólica no conjunto, perfazendo as três fontes na avaliação. Especificamente, o critério de risco abaixo de 80% da receita de referência diminui, ou seja, a expectativa de receita ficar menor que 80% da receita de referência reduziu.

Ainda, observa-se nas simulações com usinas eólicas do PROINFA e do LEILÃO apresentam uma redução de risco ou um maior “hedge” do PROINFA para o LEILÃO devido ao fator de capacidade diferenciado. As usinas eólicas do LEILÃO empregam tecnologias mais recentes nos projetos e equipamentos dos parques eólicos.

De forma geral, para os estudos de casos simulados e analisados de contratação ótima, mostram-se um aumento da expectativa da receita quando as usinas são consideradas em conjunto em relação à soma das expectativas das receitas quando consideradas individualmente.

Nos casos de estudo de portfólio ótimo adotou-se um critério de risco baseado no VaR de 95% de confiança, porém insuficiente para a avaliação conforme já discutido no capítulo de Revisão Bibliográfica. Desta forma adotou-se o CVaR(5%) para a média das receitas anuais – RT e para o Valor Presente Líquido – VPL do projeto de investimento.

O estudo de caso 7 em que os custos de investimentos eram iguais, a solução encontrada foi o portfólio ótimo de PCH e Biomassa excluindo a Eólica por possuir menor fator de capacidade e respeitando os critérios de riscos adotados.

O resultado de estudo de caso 8 em que a eólica possuía o menor custo de investimento foi um portfólio ótimo de eólica no lugar da Biomassa por possuir sazonalidade de geração praticamente igual à PCH.

E para o último estudo de caso (9) de portfólio ótimo apresentou como resultado de portfólio ótimo com a Eólica e a Biomassa pelo fato de possuírem custo de investimento menor que a PCH.

Portanto, para os resultados dos estudos de casos de portfólio ótimo apresentam uma predominância pela maximização da receita ora pela usina de maior fator de capacidade ora pela usina que possui menor custo de investimento.

Ainda os resultados dos estudos de casos mostraram que conforme se aumenta o Limite do CVaR da Receita Anual encontra-se uma solução de portfólio ótimo respeitando os limites de risco.

De modo geral a modelagem proposta para a mitigação de risco via complementação energética utilizando a geração eólica se mostrou adequada para os estudos de caso simulados.

A solução para o problema do investimento (portfólio ótimo) via algoritmo genético mostrou robusta para os casos estudados de modo que obtivesse portfólio ótimo.

Quanto a estudos futuros, embora já existam trabalhos considerando os dados de geração eólica de forma estocástica, as modelagens descritas neste trabalho e na simulação dos estudos de caso poderiam tratar a geração eólica como uma variável não determinística, ou seja, como um processo estocástico.

De modo que o tratamento estocástico possa ser modelado adequadamente e implementada em uma ferramenta computacional, o desenvolvimento do sistema computacional e a linguagem de programação deveriam proporcionar tal dimensionamento, pois poderia exigir um esforço computacional de grande monta.

REFERÊNCIAS

- [1] Amarante, O. A. C. do; Schultz, D. J.; Bittencourt, R. M. e Rocha, N. A. **Complementaridade Sazonal dos Regimes Hidrológico e Eólico no Brasil**. 2001, DEWI Magazin, 19
- [2] Schultz, D. J.; Amarante, O. A. C. Do; Rocha, N. de A.; Bittencourt, R. M. e Sugai, M. R. von B. **Sistemas Complementares de Energia Eólica e Hidráulica no Brasil**. Revista Espaço Energia, 3, 2005
- [3] Marinho, M. H. da N. e Aquino R. R. B. de **Oferta de energia através da complementariedade sazonal hidro-eólica**. [Online]. Available: <http://www.cerpch.org.br>
- [4] Marinho, M. H. N.; Cerqueira, J. J. F. e Martinez, L. **Estudo da Complementaridade Hidro-Eólica para Regularização Sazonal de Energia Elétrica**. SBSE, 2006
- [5] Marinho, M. H. da N. **Oferta de energia através da complementariedade sazonal hidro-eólica no Estado de Pernambuco**. [Online]. Available:
- [6] Guedes, D. F. e Cavalcanti, J. **Análise Energética do Impacto da Geração Eólica com Atraso em Obras do Sistema Elétrico Brasileiro**. [Online]. Available:
- [7] Chade, J. F. e Sauer, I. L. **An assessment of wind power prospects in the Brazilian hydro thermal system**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, pp.742–753, 2013
- [8] Souza, A. de L. G. da S. **Sugestão para definição do conceito de VaR para corporações**. dissertação de mestrado, Escola De Pós-Graduação Em Economia, FGV, 2008
- [9] Street, A.; Barroso, L. A.; Flach, B.; Pereira, M. V. e Granville, S. **Risk Constrained Portfolio Selection of Renewable Sources in Hydrothermal Electricity Markets**. IEEE Transactions On Power Systems, 3(24), 2009
- [10] Ramos, D. S.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. e Ishida S. **Análise estruturada de portfólio de unidades de geração de características sazonal e complementar com o suporte de algoritmos genéticos**. Citenel, 2013

- [11]Denault, M.; Dupuis, D.; Couture-Cardinal, S. **Complementarity of Hydro and Wind Power: Improving the Risk Profile of Energy Inflows.** Energy Policy, 37, pp. 5376-5384, 2009
- [12]García-González, J. **Hedging strategies for wind renewable generation in electricity markets.** IEEE, 2008
- [13]García-González, J.; Muela, R. M. R. de la; Santos, L. M. e González, A. M. **Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market.** IEEE Transactions On Power Systems, 2(23), 2008
- [14]Belanger, C. e Cagnon L. **Adding wind energy to hydropower,** Energy Policy, 30, pp. 1279-1284, 2002
- [15]Liu, Y.; Jiang; C., Xue, G. e Shen, J. **Risk Reserve Constrained Economic Dispatch of Wind Power Penetrated Power System Based on UPSMC and SAGA Algorithms.** Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5(3), pp. 1067-1074, 2013
- [16]Awerbuch, S. **Portfolio-Based Electricity Generation Planning: Policy Implications For Renewables And Energy Security.** Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (11), pp. 693–710, 2006
- [17]. Ramos, D. S.; Fadigas, E. A. F. A.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. **Metodologia e Ferramental de Apoio à Decisão Empresarial para implantação de Empreendimentos de Geração Sazonal de Energia, contemplando mitigação de riscos de mercado e análise de Portfólio.** Relatório 1 do Projeto de Pesquisa&Desenvolvimento da CESP, 2011, Não Publicado
- [18]STULZ, R. **Rethinking Risk Management.** Journal of Applied Corporate Finance, 1996, 9, 8-24;
- [19]PEROBELLI, F. F. C. **Fluxo de Caixa em Risco: Diferentes Métodos de Estimação testados no setor siderúrgico brasileiro.** Revista Brasileira de Finanças, 2007
- [20]Hayt, G. & Songs, S. **Handle with sensitivity.** Risk Magazine, 1995, 8(9):94–99
- [21]Ramos, D. S.; Susteras, G; Chaves, J. R. de A. e Susteras, A. C. V. J. **Attracting Wind Generators to the Wholesale Market by Mitigating Individual**

Exposure to Intermittent Outputs: an Adaptation of the Brazilian Experience with Hydro Generation. IEEE, 2009

- [22] Ramos, D. S.; Guarnier; E. e Camargo; L. A. S. **Incorporando os efeitos da complementaridade Hidro-Eólica na formação do Portfólio de Empresas Geradoras de Energia Elétrica.** SEPOPE, 2012
- [23] Ramos, D. S.; Guarnier; E. e Witzler, L. T. **Using the seasonal diversity between renewable energy sources to mitigate the effects of Wind generation uncertainties.** IEEE Transmission & Distribution Latin America, 2012
- [24] Ramos, D. S.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. e Ishida S. **Metodologia e ferramental de apoio à decisão empresarial para formação de portfólio de fontes renováveis.** XVERIAC, 2013
- [25] Ramos, D. S.; Fadigas, E. A. F. A.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. **Metodologia e Ferramental de Apoio à Decisão Empresarial para implantação de Empreendimentos de Geração Sazonal de Energia, contemplando mitigação de riscos de mercado e análise de Portfólio.** Relatório Final do Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento da CESP, 2012, Não Publicado
- [26] Ramos, D. S.; Fadigas, E. A. F. A.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. **Metodologia e Ferramental de Apoio à Decisão Empresarial para implantação de Empreendimentos de Geração Sazonal de Energia, contemplando mitigação de riscos de mercado e análise de Portfólio.** Nota Técnica - Investimento, 2012, Não Publicado
- [27] Ramos, D. S.; Fadigas, E. A. F. A.; Guarnier; E.; Camargo; L. A. S. **Metodologia e Ferramental de Apoio à Decisão Empresarial para implantação de Empreendimentos de Geração Sazonal de Energia, contemplando mitigação de riscos de mercado e análise de Portfólio.** Estudo de caso documentados, 2012, Não Publicado
- [28] Markowitz, H.; **Portfolio Selection.** The Journal of Finance, 7(1): 77-91, 1952
- [29] Risk Metrics Group; Corporate Metrics, **The Benchmark for Corporate Risk Management.** 1999
- [30] Whitley, D.; **The GENITOR algorithm and selection pressure: Why rank based allocation of reproductive trials is best.** Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, 116- 121, 1989.

- [31] Baker, J.; **Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm**. Proc. of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, 14- 21. 1987.
- [32] Goldberg, D. E.; **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley. 1989.
- [33] Holland, J. H.; **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. MIT Press.1975

ANEXO A – VaR Corporativo

Se o interesse de quem analisa o risco numa corporação será uma variação de seu valor econômico, então, propõe-se aqui como medida mais apropriada, aquela que guarda maior analogia com o VaR em finanças. Será assim possível definir tal métrica como o VaR Corporativo, tal que:

VaR Corporativo: perda potencial (máxima) de valor econômico num dado horizonte de tempo a um nível de significância $a\%$ (confiança $1-a\%$), ao se levar em consideração todos os fluxos de caixa da empresa.

Ou seja, é o VaR "tradicional" (de finanças) sob uma abordagem mais geral e integrada que leva em consideração diferentes aspectos que devem ser tratados de forma consolidada no mundo corporativo tais como gestão do caixa, da dívida, de hedge e dos fluxos de caixa. Matematicamente falando, a definição não muda; o que muda são as equações de mapeamento, as projeções de volatilidade e o horizonte relevante.

Outro fator a se considerar é na análise dos fluxos de caixa. Além da questão de marcação a mercado, deve-se tomar extremo cuidado com a taxa de desconto utilizada no cálculo de valor presente dos fluxos. E ainda no tratamento que se deve dar aos fluxos de caixa. Para tal, recorre-se às técnicas de avaliação da teoria de Finanças Corporativas⁸.

⁸Segundo o modelo do CAPM o valor da empresa é dado pelo valor presente de seus fluxos de caixa futuros, descontados a uma taxa ajustada a risco. Portanto, a determinação do valor presente dos fluxos de caixas de uma empresa passa, antes de tudo, pela discussão sobre as taxas de desconto a serem utilizadas. Discussão que não será abordada neste trabalho.