



## Grupo de Estudo de Comercialização, Economia e Regulação do Mercado de Energia Elétrica-GCR

### Proposta de mitigação do risco de produção de energia de longo termo em leilões de energia eólica através do Markup de preço

ANTONIO CAMELO DA COSTA PERRELLI(1); EDUARDO DE AGUIAR SODRÉ(1);  
CHESF(1);

#### RESUMO

Os leilões de energia reserva objetivam aumentar a segurança do sistema e mitigar o risco hidrológico. A abordagem econômica é teoricamente responsável pela definição do preço e pode ser determinística ou probabilística. A adequabilidade de cada metodologia está sujeita à precisão e finalidade dos resultados da investigação. A depender da metodologia utilizada, a superestimação econômica do empreendimento e consequente subestimação do preço são possíveis. O objetivo deste trabalho é investigar a qual abordagem os preços estão relacionados e propor aprimoramentos através do uso de técnicas de simulação e otimização para *markup* de preço.

#### PALAVRAS-CHAVE

Viabilidade econômico-financeira, Energia Eólica, Monte Carlo, Processo Decisório, Probabilístico

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

2.0 - Os leilões de energia são processos de alocação eficiente de preço e têm sido instrumentais benéficos para a expansão da oferta em países com adequado nível de competição no mercado de energia elétrica. Os preços resultantes dos certames representam o nível ótimo dos custos de geração a serem repassados aos consumidores (MAURER, 2011).

3.0 - A decisão de investir é função dos retornos e riscos referentes a cada empreendimento. A produção de energia é um fator crítico para a viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico. O comportamento dos ventos possui natureza probabilística e é considerado uma incerteza inerente ao fluxo de caixa esperado do investimento. A ausência de instrumento financeiro de proteção (*hedge*) específico para este risco expõe diretamente o investidor à variabilidade da velocidade dos ventos que pode ser capaz de inviabilizar o projeto a longo prazo caso o preço ofertado no leilão seja insuficiente para adequar o risco incorrido ao perfil do investidor.

As diferenças entre as aproximações determinísticas e probabilísticas em diversos experimentos no campo das Ciências Exatas são debatidas por Paul Meyer (1983). Segundo o autor: "*Na natureza, existem muitos exemplos de experimentos, para os quais modelos determinísticos são apropriados*" (MEYER, 1983, p.2). O autor cita alguns destes exemplos como a lei da gravitação e conclui que: "*Para um grande número de situações, o modelo matemático determinístico (...) é suficiente*" (MEYER, 1983, p.3). Todavia, o autor pondera que: "*Contudo, existem também muitos fenômenos que requerem um modelo matemático diferente para investigação*" (MEYER, 1983, p.3). Um dos exemplos utilizados pelo autor para sustentar esta afirmação relaciona-se às observações meteorológicas, de pura natureza estocástica. Em relação a estas o autor deduz que: "*Novamente estaremos nos ocupando de um fenômeno que não se presta a um tratamento determinístico. Um modelo probabilístico*



*explica a situação mais rigorosamente.*” (MEYER, 1983, p.3). O autor também cita um exemplo relacionado ao fragmento de material radiativo que emite partículas alfa e conclui que: *“parece não existir modelo determinístico razoável que forneça o número de partículas emitidas (...) Deveremos considerar, em seu lugar, um modelo probabilístico”.* (MEYER, 1983, p.3)

Embora os exemplos utilizados por Paul Meyer (1983) estejam relacionados às temáticas da Física, o debate acerca da adequabilidade das aproximações determinísticas e probabilísticas estende-se também ao campo das Finanças. Segundo Lifland (2015), os resultados obtidos através do uso de ferramentas determinísticas e probabilísticas são: *“surpreendentes a partir do momento em que determinado empreendimento considerado aceitável na análise tradicional, pode demonstrar-se inaceitável após a introdução de um modelo dinâmico”* (LIFLAND, 2015, p.56)

A conveniência da utilização de um modelo determinístico ou probabilístico para o processo decisório de investimento em energia é uma decisão individual de cada empresa. A característica da análise econômico-financeira determinística pode desconsiderar o real risco de produção incorrido pelo investidor ao ser incapaz de incorporar, no processo decisório de investimento, as variáveis aleatórias que reproduzem o comportamento dos ventos a longo prazo. Por consequência, os preços resultantes dos certames podem divergir do nível ótimo a ser repassado aos consumidores.

#### 4.0 - TOMADA DE DECISÃO ECONÔMICA

A tomada de decisão econômica em leilões de energia tem por base a comparação entre a Taxa Interna de Retorno (TIR), calculada sob a ótica FCFE (*Free Cash Flow to Equity*), e o custo de capital próprio da empresa ( $K_e$ ). Cenários em que a TIR supera o  $K_e$  são considerados favoráveis e representam sinalização positiva para investimento.

Sob o enfoque determinístico, a premissa de geração de energia eólica resume-se ao nível Percentil 50 (P50) certificado e a contratação de energia, advinda do Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR), ao nível máximo Percentil 90 certificado (P90).

Uma questão fundamental na área de Finanças decorre de que forma o risco de um investimento deveria afetar o seu retorno esperado (PEROLD, 2004). O modelo de precificação de ativos, do inglês *Capital Asset Price Model* (CAPM), considera a tomada de decisão sob incerteza ao definir uma métrica de risco com base no preço de ativos que influenciam as preferências do investidor que escolherá a alternativa de investimento que maximize sua utilidade (SHARPE, 1964).

A definição do  $K_e$  de uma empresa é parte inseparável do processo decisório econômico e representa a rentabilidade mínima exigida pelo investidor. O modelo CAPM, em sua formulação original apresentado na Equação 1, representa o  $K_e$  como função da taxa livre de risco (preço do tempo requerido para postergar o consumo), parâmetro de risco Beta (quantidade de risco) e prêmio de mercado (preço de mercado do risco).

$$K_e = R_f + \beta (R_m - R_f) \quad (1)$$

Em que:

$K_e$ : custo de capital próprio

$R_f$ : taxa livre de risco

$\beta$ : parâmetro de risco entre o retorno no mercado e o ativo livre de risco

$R_m - R_f$ : prêmio ao risco

Desta forma, não há relação direta do  $K_e$  com os riscos específicos dos projetos como o risco de produção. A decisão de investir sob a ótica FCFE é dada pela Equação 2:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{investir} - \\ \text{n\~{a}o inve} \end{array} \right. \quad (2)$$

A variável “ $Inv_t$ ” representa o montante de investimento no tempo “ $t$ ”. A TIR é a taxa de desconto que torna nulo o Valor Presente Líquido (VPL) na forma demonstrada pela Equação 3:

$$- \quad (3)$$

Em exemplo prático, o VPL será nulo se o  $Ke$  do tomador de decisão for igual à TIR FCFE do empreendimento, pois não haverá geração de valor ( $VPL=0$ ). No cenário da TIR FCFE ser menor do que o  $Ke$ , haverá destruição de valor ( $VPL<0$ ), pois a geração de caixa esperada do empreendimento será incapaz de prover a rentabilidade mínima exigida pelo investidor. Em teoria, os incentivos para investimento nestes casos citados são inexistentes. Haverá incentivo para investimentos no cenário em que a TIR supere o  $Ke$ , haja vista a geração de valor positiva ao investidor ( $VPL>0$ ).

## 5.0 - MÉTODO

O método proposto neste artigo consiste na aplicação, em modelo econômico-financeiro para análise de viabilidade já existente, de algoritmos meta-heurísticos conjuntamente com as ferramentas denominadas Método de Monte Carlo (MMC) e Valor em Risco Condicional (CVaR) para a avaliação, sob a ótica probabilística, da relação entre o preço e o risco de produção.

A análise sob a ótica probabilística com utilização de um processo combinado de simulação e otimização permite que o efeito do risco de produção tenha seu impacto mensurado na rentabilidade. Este estudo optou pela utilização do MMC para produzir a aleatoriedade no modelo proposto. A simulação via MMC é o método em que variáveis aleatórias uniformemente distribuídas são geradas e transformadas em outras distribuições (GLASSERMAN, 2003).

A utilização de algoritmos meta-heurísticos tem sido comum no campo de Pesquisa Operacional (JUAN et al, 2015). Neste estudo foi utilizado para o processo de otimização a ferramenta *OptQuest* introduzida em Glover et al. (1996) e aprofundada por Laguna (1997), Laguna (1997) e Glover et al. (1998). Esta ferramenta é capaz de resolver eficientemente o problema de otimização e encontrar o ponto de solução mais próximo do ótimo global (KLEIJNEN et al., 2007). A técnica incorpora algoritmos meta-heurísticos e engloba diferentes tipos de técnicas de otimização como algoritmos genéticos, arrefecimento simulado e busca-tabu (EVANS, 2004)

### 6.0 - 3.1 Modelagem Determinística

A Receita Operacional Bruta de um empreendimento é resultado do somatório da receita advinda do CCEAR e da Receita do Saldo entre Ressarcimento e Indenização (Receita Variável). Neste estudo não foi considerada a possibilidade de Comercialização no Ambiente de Contratação Livre (ACL). A Equação 4 apresenta o cálculo da Receita Operacional Bruta:

$$ROB_n = R C C E A R_n + R S A \quad (4)$$

Em que:

$ROB_n$ : Receita Operacional Bruta no mês  $n$ , em R\$ Mil

$R C C E A R_n$ : Receita Operacional Bruta do CCEAR no mês  $n$ , em R\$ Mil



$SAI_n$ : Receita do Saldo entre Ressarcimento e Indenização no mês  $n$ , em R\$ Mil

A Equação 5 representa a receita advinda do CCEAR e a Equação 6, o cálculo da Garantia Física:

$$RCCEAR_n = h_n \cdot GF \cdot P_n / 10^6 \quad (5)$$

Em que:

$h_n$ : número de horas no mês;

GF: Garantia Física (MW-med.);

$P_n$ : Preço de venda no CCEAR reajustado no mês  $n$  de acordo com o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

$$GF = \frac{P90_{ac} \cdot (1 - T)}{TEIF + IP + \Delta P} \quad (6)$$

$P90_{ac}$ : Percentil 90 da função de distribuição de probabilidade certificada da geração anual de energia;

TEIF: Taxa de indisponibilidade forçada;

IP: taxa de indisponibilidade programada;

$\Delta P$ : estimativa do montante de consumo interno acrescido das perdas internas até o ponto de conexão.

O P50 estimado para o projeto eólico, embora seja naturalmente apenas um ponto na função de distribuição de probabilidade certificada, é tratado como “média” na aproximação determinística de acordo com a Equação 7:

$$Engerada_n = P50_j \quad (7)$$

Em que:

$Engerada_n$ : Montante de energia gerada no mês  $n$ ;

$P50_j$ : Percentil 50 da distribuição de probabilidade certificada da geração anual de energia, livre de perdas.

A utilização do P50 como preditor de geração de energia gera excedente de produção em relação ao contrato. Desta forma, admite-se a premissa de saldo positivo de comercialização de energia *ad aeternum* conforme Equação 8:

$$\dot{C} \quad (8)$$

### 7.0 - 3.2 Alterações Propostas à Modelagem Determinística: 6 etapas

A fim de auferir a rentabilidade determinística do empreendimento, fez-se necessário inicialmente construir um modelo econômico-financeiro de análise de viabilidade capaz de reproduzir a Demonstração do Resultado do Exercício (D.R.E.) e a Demonstração do Fluxo de Caixa (D.F.C.) para um empreendimento eólico hipotético. Após este passo, foram realizadas as etapas propostas adiante.

**a. Etapa 1 - Preço de Partida:** Esta etapa deve ser realizada em um modelo econômico-financeiro determinístico. O preço de partida ( $P_i$ ) a ser encontrado será também determinístico e deve ser capaz de igualar a TIR FCFE Real<sup>1</sup> ao Custo de Capital Próprio Real (VPL = 0). O empreendimento torna-se economicamente viável para preços superiores à  $P_i$ . Desta forma, o projeto será capaz de gerar VPL positivo para qualquer preço ofertado marginalmente acima do preço de partida. As Equações 9 a 11 demonstram esta etapa

$$MaxTI \quad (9)$$

<sup>1</sup> O termo “TIR FCFE Real” representa a rentabilidade já descontada pela expectativa de inflação



Sujeito a

$$P_i > 0 \quad (10)$$

$$TIRFC \quad (11)$$

**b. Etapa 2 – Convergência:** Esta etapa é probabilística e calcula o número ideal de iterações a serem executadas em cada modelo determinístico. O teste de convergência tem por objetivo definir o número ideal de iterações a serem executadas pelo MMC a partir de determinado intervalo de confiança e nível de convergência pretendidos. Neste estudo, foram utilizados os parâmetros de 99% para o intervalo de confiança e 5% para o nível de convergência. A convergência foi realizada para o desvio-padrão da TIR FCFE Real com o objetivo de aumentar a precisão do modelo através dos seguintes passos:

- 50 iterações são realizadas e o desvio-padrão da TIR FCFE Real é calculado;
- Para as próximas 50 iterações, o desvio-padrão da TIR FCFE Real é recalculado e apura-se a variação percentual entre os desvios-padrões.

A convergência será atingida a partir do momento em que a variação percentual seja igual ao nível de tolerância assumido.

**c. Etapa 3 – Simulação:** A fim de estimar a função de distribuição de probabilidade resultante da TIR FCFE Real pela consideração do risco de produção como variável aleatória, a Equação 7 incorpora uma função de distribuição de probabilidade gaussiana (FDPG), conforme disponibilizada em documentos de certificação dos ventos, em substituição à variável determinística P50 na forma da Equação 12. A razão da escolha de múltiplos níveis de desvios tem por objetivo analisar o comportamento do preço em relação a diferentes perfis de velocidade dos ventos. Desta forma, espera-se construir comportamento do preço como função da variabilidade dos ventos.

$$Engera \quad (12)$$

Os seguintes parâmetros para a FDPG demonstrados na Tabela 1 foram utilizados para análise.

Tabela 1 – FDPG

Parâmetros	Valores	Utilizado na metodologia
Percentil 50	46%	Determinística, Probabilística
Percentil 90	42%	Determinística, Probabilística
Desvio-Padrão	3%,6%,9%,12%,15%,18%,21%	Probabilística

Fonte: Elaboração própria

As possibilidades de incorporação da FDPG no modelo determinístico foram testadas de acordo com as Equações 13 a 15:

$$Engerd \quad (13)$$

$$Engera \quad (14)$$

$$Engera \quad (15)$$

A Equação 13 considera que, por todo o período de concessão, a energia gerada é variável aleatória idêntica para todos os meses (n). A Equação 14 considera que as energias geradas são variáveis aleatórias iguais porém independentes entre os meses. A Equação 15 pressupõe que as energias geradas são variáveis aleatórias independentes entre os anos (h). As Equações apresentadas serão consideradas respectivamente como Método 1, Método 2 e Método 3. O número de iterações utilizado nesta e nas próximas etapas a seguir deve ser obtido na Etapa 2.

**d. Etapa 4 – Aderência:** Com o objetivo de inferir se os valores aleatórios gerados na Etapa 3 possuem aderência à determinada função de distribuição de probabilidade contínua, faz-se necessária a análise da função de distribuição acumulada empírica da TIR FCFE Real. A obtenção da função aderente é de importante relevância para a análise de risco. Dentre os testes de aderência possíveis citam-se Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk. O teste de Anderson-Darling compara a aderência entre a distribuição de probabilidade acumulada observada e a esperada.

**e. Etapa 5 – Otimização:** Nesta Etapa, o preço de decisão é função do risco de produção de energia de longo termo e as equações objetivo e restrições estão demonstradas nas Equações 16 a 19. A variável “R” representa a aversão ao risco do investidor. Neste estudo, optou-se pela utilização de 5%. Isto significa que o investidor admite que a probabilidade de sua rentabilidade ser menor ou igual ao  $K_e$  é de 5%. A otimização consiste em definir o preço de decisão ( $P_d$ ) da seguinte forma para os Métodos 1, 2 e 3:

$$Max TI \quad (16)$$

Sujeito a

$$P_d > 0 \quad (17)$$

$$\sigma_p = 3\%, \quad (18)$$

$$P(TIR \leq \dots) \quad (19)$$

**f. Etapa 6 – Curva de Melhor Ajuste:** Esta última etapa consiste em ajustar a curva de comportamento dos preços encontrados na Etapa 5 em relação aos múltiplos níveis de desvios-padrões através da utilização do método dos Mínimos Quadrados. A função de melhor ajuste a ser encontrada poderá ser, por exemplo, linear, exponencial, hiperbólica, geométrica, polinomial, entre outras.

## 8.0 - RESULTADOS

**a. Etapa 1 - Preço de Partida:** O valor do  $P_i$  calculado foi de R\$/MWh 130,63.

**b. Etapa 2 – Convergência:** O número ideal de iterações encontrado foi de 1.350. Este valor foi utilizado para todas as simulações probabilísticas. Os resultados encontrados para níveis de convergência entre 1% e 5% com 99% de intervalo de confiança estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado dos Testes de Convergência

Convergência	Iterações	Limite Inferior	Desvio Padrão	Limite Superior
1%	33.190	1,443%	1,458%	1,473%
2%	8.310	1,446%	1,475%	1,505%
3%	3.710	1,414%	1,458%	1,502%
4%	2.090	1,365%	1,422%	1,479%
5%	1.350	1,333%	1,403%	1,473%

Fonte: Elaboração do autor

c. Etapa 3 – Simulação: A Tabela 5 representa percentis calculados da TIR FCFE Real para cada método

Tabela 5 – Percentis da TIR FCFE Real

Percentil	Método 1	Método 2	Método 3
0%	3,30%	9,50%	8,46%
5%	7,46%	9,74%	9,30%
10%	8,04%	9,77%	9,45%
15%	8,48%	9,79%	9,52%
20%	8,76%	9,81%	9,58%
25%	8,96%	9,82%	9,63%
30%	9,16%	9,83%	9,68%
35%	9,33%	9,84%	9,73%
40%	9,56%	9,86%	9,76%
45%	9,74%	9,87%	9,80%
50%	9,87%	9,88%	9,84%
55%	10,02%	9,89%	9,87%
60%	10,15%	9,90%	9,90%
65%	10,33%	9,91%	9,95%
70%	10,48%	9,92%	9,98%
75%	10,62%	9,94%	10,02%
80%	10,83%	9,95%	10,07%
85%	11,03%	9,97%	10,13%
90%	11,34%	9,99%	10,20%
95%	11,75%	10,02%	10,32%
100%	13,12%	10,12%	10,89%

Fonte: Elaboração própria

d. Etapa 4 – Aderência: A Tabela 6 apresenta as distribuições de probabilidade que demonstraram melhor aderência a cada método

Tabela 6 – Resultados dos Testes de Aderência

Método	Valor A-D	Valor de p	Distribuição
1	1,853	0,154	Weibull 2p
2	0,5940	0,121	Normal
3	0,4206	0,263	Logística

Fonte: Elaboração própria

O Método 1 apresentou aderência à Weibull de 2 parâmetros com a seguinte função de distribuição de probabilidade demonstrada nas Equações 20 e 21:

$$TIR_{FCFE} \quad (20)$$

$$TIR_{FCFE} \quad (21)$$

O Método 2 apresentou aderência à função de distribuição Normal com os parâmetros apresentados nas Equações 22 e 23

$$TIR_{FCFE}' = \sigma \dot{\lambda} \dot{\lambda} \quad (22)$$

$$TIR_{FCFE}' = 0,0009 \dot{\lambda} \dot{\lambda} \quad (23)$$

O Método 3 apresentou aderência à Logística conforme demonstrado nas Equações 24 e 25

$$TIR_{FCFE} = \frac{\pi}{\sigma \sqrt{3}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{-\pi(x-\mu)}{\sigma \sqrt{3}}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{-\pi(x-\mu)}{\sigma \sqrt{3}}\right)\right)^2} \quad (24)$$

$$TIR_{FCFE} = \frac{\pi}{0,00325 \sqrt{3}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{-\pi(x-0,10409)}{0,0325 \sqrt{3}}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{-\pi(x-0,10409)}{0,00325 \sqrt{3}}\right)\right)^2} \quad (25)$$

e. Etapa 5 – Otimização: Os resultados do Preço de Partida (D) e Preços do Método 2 (M2) e Método 3 (M3) são apresentados na Tabela 7 a diferentes níveis de desvios-padrões (DP).

Tabela 7 – Decisões de Preço

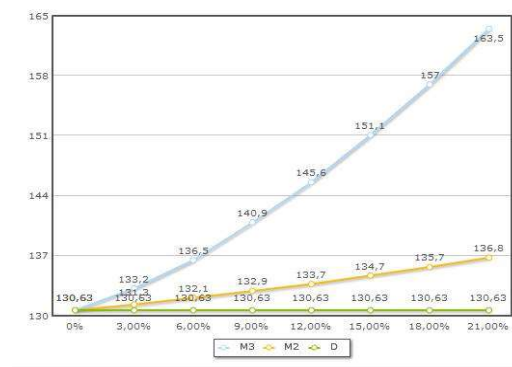
DP	D	M2	M3
0%	130,6 3	130,63	130,63
3%	130,6 3	131,30	133,20
6%	130,6 3	132,10	136,50
9%	130,6 3	132,90	140,90
12%	130,6 3	133,70	145,60
15%	130,6 3	134,70	151,10
18%	130,6 3	135,70	157,00
21%	130,6 3	136,80	163,50

Fonte: Elaboração própria

A Figura 1 apresenta o comportamento dos preços ótimos a múltiplos níveis de desvios-padrões no Método (3) e Método (2) em comparação com o Preço de Partida (D).

Figura 1– Curvas de Preços de Decisão





Fonte: Elaboração própria

f. **Etapa 6 – Curva de Melhor Ajuste:** A partir do comportamento dos preços encontrados na Etapa 3, faz-se possível ajustar pelo método de MMQ os dados com coeficiente de determinação de 99% através da utilização das regressões polinomiais apresentadas nas Equações 26 e 27:

$$Preço_M \quad (26)$$

$$Preço_M \quad (27)$$

## 9.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

O preço encontrado na Etapa 1, de R\$/MWh 130,63, representa uma estimativa de rentabilidade para a tomada de decisão determinística. O fato do  $P_i$  calculado situar-se entre os Preços Médios do 2º LER (2009) e 5º LER (2013) é positivo pois certifica a proximidade das premissas utilizadas com a realidade do setor à época. Demonstrou-se no estudo que há *spread* entre os preços. Este resultado pode indicar que a metodologia utilizada nos leilões é tipicamente determinística. Caso os documentos de certificação apresentem desvio-padrão de 12%, por exemplo, o *spread* entre preços é de aproximadamente 11,46%. Logo, enquanto a tomada de decisão determinística indica R\$/MWh 130,63, a probabilística indica R\$/MWh 145,6 ao Percentil 5%.

No Método 1 proposto, a função de distribuição de probabilidade mais aderente aos dados foi a *Weibull* de dois parâmetros. Isto ocorreu pois este Método produz cenários em que a geração de energia é menor do que a contratada para todo o período de concessão. Desta forma, as penalidades de comercialização de energia impactaram a TIR FCFE Real em grau suficiente para provocar o alongamento da cauda esquerda da função de distribuição de probabilidade. Embora este cenário seja possível estatisticamente, não há razoabilidade em considerar que isto efetivamente possa ocorrer. O objetivo na utilização deste método é apresentar o caso extremo de aversão ao risco e seu impacto no preço ofertado. Devido a isto, sua aplicação para tomada de decisão deve ser analisado com cautela.

A Equação da função de distribuição de probabilidade decorrente da aplicação do teste de aderência para o Método 1 possui parâmetro de forma de 8,55% e de escala de 10,31%. A representatividade destes números para análise de risco é relevante, pois o parâmetro de escala possui a propriedade estatística de ser o Percentil 63 da distribuição. Isto significa que a probabilidade da TIR FCFE Real ser menor ou igual a 10,31% neste caso é de aproximadamente 63%, fato este confirmado pelos valores da Tabela 5 que demonstram o Percentil 60 de 10,15% e o Percentil 65 de 10,33%.

Os resultados do Método 2 foram aderentes à função de distribuição gaussiana cujo Percentil 50 foi 9,88% e o Desvio-Padrão calculado de 0,09%. A relevância da função de probabilidade apresentada para este método encontra-se nas propriedades estatísticas desta distribuição. Aproximadamente 68,26% dos resultados estão no intervalo  $\mu \pm \hat{\sigma}$ . Desta forma, a probabilidade da TIR FCFE Real estar entre 9,79% e 9,97% é de 68,26%. Em complemento, esta propriedade também se aplica ao intervalo  $\mu \pm 2 \hat{\sigma}$  com 95,44% de probabilidade da TIR



FCFE Real estar entre 9,70% e 10,06%.

A aderência à gaussiana encontrada no Método 2 decorre da propriedade matemática da lei dos grandes números haja vista que neste Método as variáveis aleatórias são consideradas como independentes para cada mês. Além disto, a TIR FCFE Real do empreendimento é simetrizada pelo fato de haver compensação entre os saldos de geração de energia. A TIR FCFE Real neste cenário é uma distribuição gaussiana pois resulta de outras distribuições gaussianas independentes.

Os resultados encontrados para o Método 3 foram aderentes à distribuição Logística devido ao fato deste ser considerado como um relaxamento das premissas do Método 2. Enquanto neste as variáveis independentes são mensais, naquele são anuais.

O Percentil 50 dos Métodos, quando comparados ao  $K_e$ , representam a métrica tradicional de tomada de decisão determinística. Embora o intervalo do Percentil 5 ao 50 seja, no Método 1, de 2,41%, o mesmo é de 0,14% no Método 2 e 0,54% no Método 3. O menor valor encontrado no Método 1 foi de 3,30% e o maior de 13,12%. No Método 2, o menor foi de 9,50% e o maior de 10,12%.

A largura do intervalo da TIR FCFE Real encontrada no Método 1 representa que o *trade-off* entre risco e retorno é consideravelmente maior do que nos outros Métodos. No Método 2, o *trade-off* encontrado é o menor e o Método 3 possui *trade-off* intermediário. A probabilidade da TIR FCFE Real ser menor do que o  $K_e$  para os Métodos 1, 2 e 3 é de, respectivamente, 50%, 45,56% e 55,41%. O elevado *trade-off* entre risco e retorno encontrado no Método 1 possivelmente inviabiliza o mesmo para fins de tomada de decisão.

O Método 2 possui *trade-off* praticamente inexistente entre risco e retorno. A utilização deste Método na tomada de decisão em leilões de energia acarretaria na invalidação do pilar central da análise econômico-financeira em que o investidor requer mais retorno à medida que assume maior risco e também reduziria o risco pós-operacional a um patamar insignificante. Neste caso, a diferença entre a situação considerada risco zero (Percentil 0, TIR FCFE Real mínima) e risco máximo (Percentil 100, TIR FCFE Real máxima) é de apenas 0,62%. Isto significa que o risco de geração de energia de longo termo é praticamente anulado pela regra de comercialização de energia.

O Método 3 apresentou *trade-off* mais adequado à realidade com largura de intervalo de 2,43%. Espera-se que este intervalo seja diretamente proporcional ao " $R$ " apresentado na Equação 19. A consideração de distribuições independentes entre os anos corrobora com a aproximação *Weibull* da velocidade dos ventos que considera a variação horária média da velocidade do vento dentro de um mesmo ano. À medida que a variabilidade dos ventos aumenta, o preço é incrementado para que sejam supridas as condições da otimização ao Percentil 5%.

O intercepto das Equações 26 e 27 representam aproximadamente o preço determinístico. Os resultados sugerem que o *mark-up* possui relação polinomial com o risco de produção. Os resultados de  $Preço_{M2-CCEAR}$  e  $Preço_{M3-CCEAR}$  apresentam o *mark-up* sugerido para mitigação do risco de produção ao Percentil 5% para os Métodos 2 e 3. Nota-se que o preço determinístico é insensível em relação ao risco de produção e permanece o mesmo para todos os desvios-padrões.

Como a decisão determinística baseia-se na rentabilidade encontrada ao nível do P50, torna-se possível o viés na tomada de decisão para múltiplos empreendimentos que, embora produzam a mesma rentabilidade, possuem riscos diferentes.

## 10.0 - CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a incorporação do risco certificado à tomada de decisão econômico-financeira produz preços maiores. A consideração apenas do risco de produção de energia (pós-operacional) neste estudo evidencia que mesmo que todo o risco pré-operacional seja mitigado, a utilização da métrica clássica de tomada de decisão determinística pode gerar viés à tomada de decisão.

A diferença encontrada entre os preços deve servir de alerta às empresas em seus processos decisórios. O aperfeiçoamento das regras de comercialização e melhoria na qualidade temporal dos dados anemométricos



podem contribuir consideravelmente para a mitigação do risco de produção e aumento da competitividade do setor.

#### 11.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EVANS, J.; LAGUNA, M. OptQuest User Manual. Decisioneering, Denver CO, 2004.
- (2) GLASSERMAN, Paul. Monte carlo methods in Financial Engineering. Springer Science & Business Media, 2013.
- (3) GLOVER, Fred. et al. The OptQuest approach to Crystal Ball simulation optimization. Graduate School of Business. University of Colorado, 1998.
- (4) GLOVER, F. New advances and application of combining simulation and optimization. Proceedings of the 28th conference on Winter simulation. IEEE Computer Society, 1996 p. 144-152
- (5) JUAN, Angel et al. A review of simheuristics: extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. Operations Research Perspectives, v.2, p. 62-72, 2015
- (6) LAGUNA, Manuel. Methaeuristic Optimization with Evolver, Genocop and OptQuest. EURO/INFORMS Joint International Meeting, Plenaries and Tutorials. 1997. P. 141 - 150
- (7) LAGUNA, Manuel. Optimization of complex systems with OptQuest. A White Paper from OptTek Systems, Inc, 1997
- (8) LIFLAND, Steven. Creating a Dynamic DCF Analysis: a detailed excel approach utilizing monte carlo methodology. Journal of Higher Education Theory and Practice Vol. 15, n. 2, p. 56, 2015
- (9) MAURER, Luiz; BARROSO, Luiz. Electricity auctions: an overview of efficient practices. The World Bank Publications, 2011.
- (10) MEYER, Paul. Probabilidade: Aplicações à Estatística. 2ª edição. LTC, 1983.
- (11) PEROLD, André F. The capital asset pricing model. Journal of economic perspectives, v. 18, n. 3, p. 3-24, 2004.
- (12) SHARPE, William F. Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk. The journal of finance, v. 19, n. 3, p. 425-442, 1964.
- (13) KLEIJNEN, Jack; WAN, Jie Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 15, n. 3, p. 354 – 362, 2007

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Antonio Camelo da Costa Perrelli, nascido em Recife, Pernambuco, em 1982. Economista da Chesf desde 2009.



**XXV SNTPEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

4097  
GCR/06

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

Professor visitante, na disciplina de Análise de Viabilidade Técnica e Econômica, do Curso de Especialização em Energia Solar e Eólica da Universidade de Pernambuco (UPE). Graduado em Ciências Econômicas pela UFPE (2005), especialista em Finanças Corporativas pelo IBMEC (2013) e Mestre em Tecnologia da Energia pela Universidade de Pernambuco (UPE). Foi profissional certificado em Gestão de Riscos Corporativos ISO 31000 pela *Global Institute for Risk Management Standards* (2015-2018).