

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Lucas do Carmo Yamaguti**

**DESPACHO ÓTIMO DE GERAÇÃO E CONTROLE DE POTÊNCIA  
REATIVA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

**ILHA SOLTEIRA  
2019**



Lucas do Carmo Yamaguti

# DESPACHO ÓTIMO DE GERAÇÃO E CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani  
Orientador

ILHA SOLTEIRA

2019



FICHA CATALOGRÁFICA

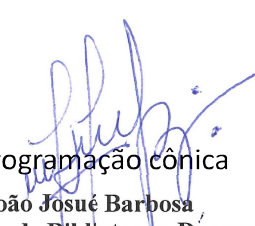
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Y19d Yamaguti, Lucas do Carmo.  
Despacho ótimo de geração e controle de potência reativa no sistema  
elétrico de potência / Lucas do Carmo Yamaguti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019  
155 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani  
Inclui bibliografia

1. Fluxo de potência ótimo. 2. Controle de reativos. 3. Programação cônica  
de segunda ordem. 4. Programação estocástica.



João Josué Barbosa  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação  
Diretor Técnico  
CRB 8-5642

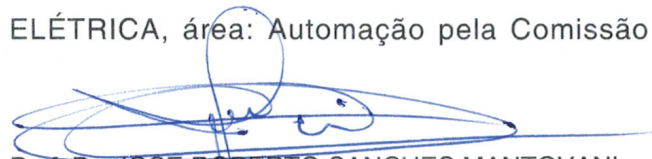
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Fluxo de Potência Ótimo de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência

**AUTOR:** LUCAS DO CARMO YAMAGUTI

**ORIENTADOR:** JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA

Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 29 de agosto de 2019

*Dedico:*

*Primeiramente à Deus, aquele que sempre nos protege;*

*Aos meus pais, Cândido e Aparecida, por todo amor, ensinamentos e proteção;*

*À minha esposa, amiga e companheira Larissa A. Alves por todo carinho, paciência e  
compreensão;*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor José Roberto Sanches Mantovani pela orientação, amizade, ensinamentos, conselhos e imensurável paciência durante estes anos que trabalhamos juntos;

Ao Dr. Juan Manuel Home Ortiz e Dr. Marcel Chuma Cerbantes pela amizade e auxílio no desenvolvimento deste trabalho;

À todos os companheiros do Laboratório de Planejamento de Sistema de Energia Elétrica - LaPSEE, por todo carinho demonstrado durante estes anos de trabalho;

À todos professores, técnicos e amigos da FEIS – UNESP por toda ajuda que me proporcionaram;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projetos 2015/21972-6 e 2017/18314-2 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pelo suporte financeiro.

## RESUMO

Neste trabalho são propostos modelos matemáticos determinístico e estocástico de programação cônica de segunda ordem em coordenadas retangulares para o problema de fluxo de potência ótimo de geração e controle de potência reativa no sistemas elétricos de potência, considerando as minimização dos custos de geração de energia, perdas ativas da rede e emissão de poluentes no meio ambiente. Os modelos contemplam as principais características físicas e econômicas do problema estudado, assim como os limites operacionais do sistema elétrico. Os modelos são programados em linguagem AMPL e suas soluções são obtidas através do *solver* comercial CPLEX. Os sistemas testes IEEE30, IEEE118 e ACTIVSg200 são utilizados nas simulações computacionais dos modelos propostos. Os resultados obtidos pelo modelo determinístico desenvolvido são validados através de comparações com os resultados fornecidos pelo *software* MATPOWER<sup>®</sup>, onde ambos consideram apenas a existência de gerações termoelétricas. No modelo estocástico utiliza-se a técnica de geração de cenários e considera-se um período de um ano (8760 horas), e geradores que utilizam fontes de geração renováveis e não renováveis.

**Palavras-chave:** Fluxo de potência ótimo. Controle de reativos. Programação cônica de segunda ordem. Programação estocástica.

## ABSTRACT

In this work we propose deterministic and stochastic mathematical models of second order conical programming in rectangular coordinates for the optimal power flow problem of reactive power generation and control in electric power systems, considering the minimization of energy generation costs, losses networks and emission of pollutants into the environment. The models contemplate the main physical and economic characteristics of the studied problem, as well as the operational limits of the electric system. The models are programmed in AMPL language and their solutions are obtained through the commercial *solver* CPLEX. The IEEE30, IEEE118 and ACTIVSg200 test systems are used in the computer simulations of the proposed models. The results obtained by the deterministic model developed are validated through comparisons with the results provided by the *software* MATPOWER<sup>®</sup>, where both consider only the existence of thermoelectric generations. The stochastic model uses the scenario generation technique and considers a period of one year (8760 hours), and generators using renewable and non-renewable generation sources.

**Keywords:** Optimal power flow. Reactive control. Second order conic programming. Stochastic programming.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais variáveis de controle e dependente utilizadas em trabalhos da literatura . . . . .	28
Figura 2 – Principais funções objetivo utilizadas na literatura . . . . .	28
Figura 3 – Principais restrições presentes na literatura . . . . .	30
Figura 4 – Custos de operação do SVC e STATCOM . . . . .	34
Figura 5 – Exemplo de função equivalente convexa . . . . .	37
Figura 6 – Cone de Lorentz . . . . .	39
Figura 7 – Linha de transmissão - modelo $\pi$ . . . . .	41
Figura 8 – Geração dos cenários: primeiro passo . . . . .	49
Figura 9 – Geração dos cenários: segundo passo . . . . .	50
Figura 10 – Geração dos cenários: terceiro passo . . . . .	50
Figura 11 – Geração dos cenários: quarto passo . . . . .	51
Figura 12 – Curva de potência de saída das turbinas eólicas . . . . .	53
Figura 13 – Curva de capacidade da turbina eólica (DFIG) . . . . .	54
Figura 14 – Curva de capacidade do painel fotovoltaico . . . . .	56
Figura 15 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2 . . .	62
Figura 16 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2	62
Figura 17 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2 . . . . .	63
Figura 18 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2 . .	66
Figura 19 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2	66
Figura 20 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2 . . . .	67
Figura 21 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2	70
Figura 22 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2 . . . . .	70
Figura 23 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2 . .	71
Figura 24 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso D2 . . . . .	72
Figura 25 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1 . . .	77
Figura 26 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1	77
Figura 27 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1 . . . . .	78
Figura 28 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso E1 . . . . .	79
Figura 29 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2 . . .	82
Figura 30 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2	82
Figura 31 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2 . . . . .	83

Figura 32 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso E2 . . . . .	84
Figura 33 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3 . . .	87
Figura 34 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E3	87
Figura 35 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3 . . . . .	88
Figura 36 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1 . .	92
Figura 37 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1	92
Figura 38 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1 . . . . .	93
Figura 39 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2 . .	96
Figura 40 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2	96
Figura 41 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2 . . . . .	97
Figura 42 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3 . .	100
Figura 43 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E3	100
Figura 44 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3 . . . . .	101
Figura 45 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1	105
Figura 46 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1 . . . . .	105
Figura 47 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1 . .	106
Figura 48 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso E1 . . . . .	107
Figura 49 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2	110
Figura 50 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2 . . . . .	110
Figura 51 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2 . .	111
Figura 52 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso E2 . . . . .	112
Figura 53 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3	115
Figura 54 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E3 . . . . .	115
Figura 55 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3 . .	116
Figura 56 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem $w_3 = 1,00$ - Caso E3 . . . . .	117
Figura 57 – Sistema IEEE30 - Topologia . . . . .	128
Figura 58 – Sistema IEEE118 - Topologia . . . . .	132
Figura 59 – Topologia - Sistema ACTIVSg200 . . . . .	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das principais fontes de potência reativa . . . . .	31
Tabela 2 – Funções objetivo utilizadas no modelo determinístico . . . . .	48
Tabela 3 – Funções objetivo utilizadas no modelo estocástico . . . . .	57
Tabela 4 – Sistema IEEE30 - Caso D1 e MATPOWER® . . . . .	60
Tabela 5 – Sistema IEEE30 - Caso D2 . . . . .	61
Tabela 6 – Sistema IEEE118 - Caso D1 e MATPOWER® . . . . .	64
Tabela 7 – Sistema IEEE118 - Caso D2 . . . . .	65
Tabela 8 – Sistema ACTIVSg200 - Caso D1 e MATPOWER® . . . . .	68
Tabela 9 – Sistema ACTIVSg200 - Caso D2 . . . . .	69
Tabela 10 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a $FO_1$ . . . . .	73
Tabela 11 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a $FO_2$ . . . . .	73
Tabela 12 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a $FO_3$ . . . . .	74
Tabela 13 – Sistema IEEE30 - Caso E1 . . . . .	75
Tabela 14 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E1 . . . . .	76
Tabela 15 – Sistema IEEE30 - Caso E2 . . . . .	80
Tabela 16 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E2 . . . . .	81
Tabela 17 – Sistema IEEE30 - Caso E3 . . . . .	85
Tabela 18 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E3 . . . . .	86
Tabela 19 – Sistema IEEE118 - Caso E1 . . . . .	90
Tabela 20 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E1 . . . . .	91
Tabela 21 – Sistema IEEE118 - Caso E2 . . . . .	94
Tabela 22 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E2 . . . . .	95
Tabela 23 – Sistema IEEE118 - Caso E3 . . . . .	98
Tabela 24 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E3 . . . . .	99
Tabela 25 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E1 . . . . .	103
Tabela 26 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E1 . . . . .	104
Tabela 27 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E2 . . . . .	108
Tabela 28 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E2 . . . . .	109
Tabela 29 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E3 . . . . .	113
Tabela 30 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E3 . . . . .	114
Tabela 31 – Sistema IEEE30 - Dados dos Ramos . . . . .	129
Tabela 32 – Sistema IEEE30 - Dados das barras . . . . .	130
Tabela 33 – Sistema IEEE30 - Custos dos tipos de gerações elétricas . . . . .	130

Tabela 34 – Sistema IEEE30 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termoeletricas . . . . .	131
Tabela 35 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas IEEE118 . . . . .	131
Tabela 36 – Sistema IEEE30 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3 . . . . .	131
Tabela 37 – Sistema IEEE118 - Dados dos ramos . . . . .	132
Tabela 38 – Sistema IEEE118 - Dados das barras . . . . .	136
Tabela 39 – Sistema IEEE118 - Custos dos tipos de gerações elétricas . . . . .	139
Tabela 40 – Sistema IEEE118 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termoeletricas . . . . .	140
Tabela 41 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas IEEE118 . . . . .	141
Tabela 42 – Sistemas IEEE118 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3 . . . . .	141
Tabela 43 – Sistema ACTIVSg200 - Dados dos ramos . . . . .	142
Tabela 44 – Sistema ACTIVSg200 - Dados das barras . . . . .	147
Tabela 45 – Sistema ACTIVSg200 - Custos dos tipos de gerações elétricas . . . . .	152
Tabela 46 – Sistema ACTIVSg200 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termoeletricas . . . . .	153
Tabela 47 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas ACTIVSg200 . . . . .	154
Tabela 48 – Sistemas ACTIVSg200 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3 . . . . .	154
Tabela 49 – Carga Horária verificada por Subsistema de transmissão [MWh] . . . . .	155

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AC</b>	Corrente Alternada
<b>AMPL</b>	A Modeling Language for Mathematical Programming
<b>B&amp;B</b>	Branch and Bound
<b>DFIG</b>	Máquina de Indução Duplamente Alimentada
<b>DOGCPR</b>	Despacho Ótimo de Geração e Controle de Potência Reativa
<b>FACTS</b>	Flexible AC Transmission Systems
<b>FO</b>	Função Objetivo
<b>FPO</b>	Fluxo de Potência Ótimo
<b>FPOR</b>	Fluxo de Potência Ótimo Reativo
<b>MPI</b>	Método dos Pontos Interiores
<i>NB</i>	Número de Barras do Sistema
<i>NOCT</i>	Temperatura de Operação Nominal da Célula Fotovoltaica [ $^{\circ}C$ ]
<i>NPQ</i>	Número de Barras de Demanda
<i>NPV</i>	Número de Barras de Geração
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema
<b>PCSO</b>	Programação Cônica de Segunda Ordem
<b>PC</b>	Programação Convexa
<b>PCIM</b>	Programação Convexa Inteira Mista
<b>PL</b>	Programação Linear
<b>PLIM</b>	Programação Linear Inteira Mista
<b>PNL</b>	Programação Não Linear
<b>PNLIM</b>	Programação Não Linear Inteira Mista
<b>PQ</b>	Programação Quadrática
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência

<b>SIL</b>	Surge Impedance Loading
<b>SVC</b>	Compensador Estático de Reativos
<b>STATCOM</b>	Compensador Síncrono Estático
<b>TSC</b>	Compensadores Chaveados por Tiristores
<b>TSR</b>	Compensadores Chaveados por Reatores
<b>TCR</b>	Compensadores Controlados por Tiristores

# LISTA DE SÍMBOLOS

## CONJUNTOS

<b>B</b>	Conjunto de barras
<b>E</b>	Conjunto de barras que contêm instaladas fontes de compensação de potência reativa ( <i>shunt</i> )
<b>Gh, Ge, Gpv</b>	Conjunto de barras que contêm instaladas unidades de geração renovável (hidroelétrica, eólica e fotovoltaica, respectivamente)
<b>Gt</b>	Conjunto de barras que contêm instaladas unidades de geração não renovável (termoelétrica)
<b>K</b>	conjunto de barras vizinhas à barra $p$ , incluindo a própria barra $p$
<b>PQ</b>	Conjunto de barras de carga
<b>PV</b>	Conjunto de barras de geração
<b>R</b>	Conjunto de ramos
<b>T</b>	Conjunto de ramos que contêm transformadores instalados com controle de <i>taps</i>
<b>V<math>\theta</math></b>	Barra <i>Slack</i> ou barra de referência
$\Omega_{de,w,s}$	Conjunto de cenários das variáveis de incerteza de demanda, velocidade do vento e irradiação solar utilizadas na modelagem estocástica
$\Omega_p$	conjunto de barras vizinhas à barra $p$

## Índices

$i$	Índice para as barras do sistema
$ij$	Índices para os ramos do sistema

## Parâmetros

$a_{ij}$	Relação de transformação dos transformadores com controle de tensão instalados entre as linhas de transmissão $ij$
$b_{ij}^{sh}$	Susceptância <i>shunt</i> entre as linhas de transmissão $ij$
$c_{ge1}, c_{ge0}$	Custo de geração linear e fixo das gerações eólicas

$c_{gh1}, c_{gh0}$	Custo de geração linear e fixo das gerações hidroelétricas
$c_{Pa}$	Custo da perda ativa
$c_{gpv1}, c_{gpv0}$	Custo de geração linear e fixo das gerações fotovoltaicas
$c_{gt2}, c_{gt1}, c_{gt0}$	Custo de geração quadrática, linear e constante das gerações termoelétricas
$g_{ij}, b_{ij}$	Condutância e susceptância entre as linhas de transmissão $ij$
$P_{Di}, Q_{Di}$	Potências ativa e reativa de carga na barra $i$
$P_{gt}^{min}, P_{gh}^{min}, P_{ge}^{min}, P_{gpv}^{min}$	Limites mínimos de geração de potência ativa dos geradores termoelétrico, hidroelétrico, eólico e fotovoltaico em seus respectivos barramentos
$P_{gt}^{max}, P_{gh}^{max}, P_{ge}^{max}, P_{gpv}^{max}$	Limites máximos de geração de potência ativa dos geradores termoelétrico, hidroelétrico, eólico e fotovoltaico em seus respectivos barramentos
$Q_{gt}^{min}, Q_{gh}^{min}, Q_{ge}^{min}, Q_{gpv}^{min}$	Limites mínimos de geração de potência reativa dos geradores termoelétrico, hidroelétrico, eólico e fotovoltaico em seus respectivos barramentos
$Q_{gt}^{max}, Q_{gh}^{max}, Q_{ge}^{max}, Q_{gpv}^{max}$	Limites máximos de geração de potência reativa dos geradores termoelétrico, hidroelétrico, eólico e fotovoltaico em seus respectivos barramentos
$Q_{SH_i}^{min}, Q_{SH_i}^{max}$	Capacidades mínima e máxima das fontes de compensação de potência reativa existentes na barra $i$
$r_{ij}, x_{ij}$	Resistência e indutância entre as linhas de transmissão $ij$
$S_{ij}^{max}$	Limite do fluxo de potência entre as linhas de transmissão $ij$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente em $^{\circ}C$
$\text{tg}(\delta_{ge}^C), \text{tg}(\delta_{ge}^I)$	fatores de injeção de potência indutivo e capacitivo das gerações eólicas, respectivamente
$\text{tg}(\delta_{gpv}^C), \text{tg}(\delta_{gpv}^I)$	fatores de injeção de potência indutivo e capacitivo das gerações fotovoltaicas, respectivamente
$V_i^{min}, V_i^{max}$	Limites mínimo e máximo da magnitude de tensão na barra $i$
$v_i, v_n, v_o$	Limite de velocidade mínima, nominal e máxima do vento, respectivamente



$\alpha_{gt}, \beta_{gt}, \gamma_{gt}, \zeta_{gt}, \lambda_{gt}$	Coeficientes de emissão de poluentes das gerações termoelétricas
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	Ponderação dos pesos das funções objetivo custo de geração, custo de perda ativa e emissão de poluentes, respectivamente
$\partial$	Coeficiente de temperatura
$rad_{sol}$	Irradiação solar
$T(rad_{pv})_{cel}$	Temperatura das células em $^{\circ}C$
$v$	Velocidade do vento
$\varepsilon$	Tolerância angular
$\rho_{de,w,pv}$	Combinação das probabilidades dos cenários de demanda, velocidade do vento e irradiação solar

### Variáveis

$d_i$	Variável auxiliar de tensão no barramento $i$
$\delta_i, \delta_{ij}$	Angulo da tensão no barramento $i$ e Diferença angular entre as tensões dos barramentos $i$ e $j$
$e_{ij}, f_{ij}$	Variáveis auxiliares real e imaginária, respectivamente, associadas ao produto dos módulos de tensões entre as barras $ij$ em coordenada retangular
$p_{ij}, q_{ij}$	Fluxos de potência ativo e reativos entre as linhas de transmissão $ij$
$p_i^{inj}, q_i^{inj}$	Injeção de potência ativa e reativa, respectivamente, da barra $i$
$p_{gt}, p_{gh}, p_{ge}, p_{gpv}$	Geração de potência ativa das gerações termoelétrica, hidroelétrica, eólica e fotovoltaica, respectivamente
$q_{gt}, q_{gh}, q_{ge}, q_{gpv}$	Geração de potência reativa das gerações termoelétrica, hidroelétrica, eólica e fotovoltaica, respectivamente
$q_{SH_i}$	Potência reativa fornecida pelos dispositivos <i>shunts</i> dos barramentos $i$

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1	Revisão bibliográfica . . . . .	17
<b>1.1.1</b>	<b>Programação não linear (PNL) . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Programação convexa (PC) . . . . .</b>	<b>22</b>
1.2	Objetivos . . . . .	25
1.3	Organização . . . . .	25
<b>2</b>	<b>FORMULAÇÃO GERAL DO DOGCPR . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1	Fontes de potência reativa . . . . .	30
2.2	Formulação básica do problema do DOGCPR . . . . .	35
<b>3</b>	<b>OTIMIZAÇÃO CONVEXA - PROGRAMAÇÃO CÔNICA DE SEGUNDA ORDEM (PCSO) . . . . .</b>	<b>37</b>
3.1	Formulação cônica . . . . .	38
3.2	Modelos de PCSO . . . . .	39
<b>4</b>	<b>MODELOS DE PCSO MULTIOBJETIVO PARA O PRO- BLEMA DE FPO . . . . .</b>	<b>41</b>
4.1	Equações de fluxo de potência em coordenadas retangulares . . . . .	41
<b>4.1.1</b>	<b>Injeção de potência na barra <math>p</math> . . . . .</b>	<b>44</b>
4.2	Fluxo de potência em coordenadas retangulares . . . . .	45
4.3	Modelo de PCSO multiobjetivo determinístico . . . . .	46
4.4	Modelo de PCSO multi-objetivo para o problema DOGCPR estocástico . . . . .	48
<b>4.4.1</b>	<b>Geração dos cenários . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Fontes de geração renováveis e não renováveis . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Fonte de geração não renovável: Termoeletrica . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Fonte de geração renovável: Hidroeletrica . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>4.4.5</b>	<b>Fonte de geração renovável: eólica . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>4.4.6</b>	<b>Fonte de geração renovável: fotovoltaica . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>4.4.7</b>	<b>Formulação do problema do DOGCPR estocástico . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>59</b>
5.1	Modelo determinístico - Sistema IEEE30 . . . . .	60
5.2	Modelo determinístico - Sistema IEEE118 . . . . .	64
5.3	Modelo determinístico - Sistema ACTIVSg200 . . . . .	68
5.4	Modelo estocástico . . . . .	72
<b>5.4.1</b>	<b>Verificação da estratégia utilizada no modelo estocástico . . . . .</b>	<b>73</b>

5.5	Modelo estocástico - Sistema IEEE30 . . . . .	74
5.6	Modelo estocástico - Sistema IEEE118 . . . . .	89
5.7	Modelo estocástico - Sistema ACTIVSg200 . . . . .	102
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>118</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXO A – SISTEMAS TESTES . . . . .</b>	<b>128</b>
A.1	Sistema IEEE30 . . . . .	128
A.1.1	Modelo estocástico - Sistema IEEE30 . . . . .	131
A.2	Sistema IEEE118 . . . . .	132
A.2.1	Modelo estocástico - Sistema IEEE118 . . . . .	141
A.3	Sistema ACTIVSg200 . . . . .	142
A.3.1	Modelo estocástico - Sistema ACTIVSg200 . . . . .	154
	<b>ANEXO B – DEMANDAS HORÁRIAS VERIFICADAS ONS</b> <b>(2019) . . . . .</b>	<b>155</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica pode ser considerada um produto imprescindível em todas as sociedades, pois atende tanto as necessidades básicas dos cidadãos quanto auxilia na criação de novas tecnologias de armazenamento, tráfego de dados, entre outras necessidades. Consequentemente, caso ocorra alguma interrupção de seu fornecimento, observa-se um enorme impacto socioeconômico que afeta direta e indiretamente toda a sociedade.

A prevenção de problemas relacionados à interrupção do fornecimento de energia exige que procedimentos de manutenção, proteção e operação dos equipamentos do sistema elétrico de potência (SEP) sejam realizados com base em rígidos critérios técnicos e de segurança estabelecidos por normas e protocolos das empresas. Desta forma, a energia elétrica deve ser fornecida de forma independente de sua origem ou fonte geradora, atendendo os requisitos de qualidade e confiabilidade.

A qualidade e a confiabilidade dos SEPs estão relacionadas com a continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica e na estabilidade da frequência e tensão, sendo que a estabilidade de tensão está relacionada com a potência reativa despachável da rede.

Para que a rede opere com segurança, qualidade e confiabilidade é necessário o despacho das fontes de potência reativa instaladas nos sistemas de geração e transmissão nos diferentes cenários de operação. Os SEPs são interligados para aumentar a flexibilidade operacional e confiabilidade do serviço de eletricidade e redução dos custos de geração.

A modelagem e solução ótima do despacho de geração e controle de potência reativa (DOGCPR), considerando as restrições físicas e operacionais da rede é uma ferramenta matemática importante para avaliar a qualidade da segurança operacional estática ou quase-estática de um SEP.

O DOGCPR é um problema de programação não linear inteiro misto de grande porte multi-modal de difícil resolução. Este problema é referenciado na literatura como fluxo de potência ótimo de reativos (FPOR), sendo formulado originalmente como um modelo de otimização não convexo.

Para SEPs operando de forma centralizada, o planejamento de reativo tem sido tema de pesquisa por vários grupos no Brasil e no exterior ([GRANVILLE; LIMA, 1994](#); [IBA, 1994](#); [MANTOVANI; GARCIA, 1996](#); [MANTOVANI; MODESTO; GARCIA, 2001](#); [MACEDO et al., 2016](#)), entre outros trabalhos sobre este tema.

Os primeiros trabalhos publicados na literatura propõem a formulação e solução do problema FPOR consideram a geração de potência ativa, demanda de consumo de energia, topologia de operação do SEP, entre outros parâmetros, possuindo valores conhecidos e

fixos. Logo, as incertezas de demanda e as características do estado do sistema não são consideradas.

Pesquisas mais recentes passaram a considerar nos modelos de otimização do FPOR o comportamento estocástico (histórico de informação) da operação, demanda e geração do sistema elétrico, possibilitando o desenvolvimento de modelos mais próximos à realidade em que são consideradas fontes de geração de energia renováveis e não renováveis (LÓPEZ et al., 2015; SUBBARAJ; RAJNARAYANAN, 2009).

A penetração de fontes de geração renováveis eólicas e fotovoltaicas, recentemente, aumentou significativamente nos SEPs devido à crescente preocupação com a emissão de poluentes no meio ambiente, principalmente gases de efeito estufa emitidos pelas fontes de geração não renováveis (PROTOCOL, 1997; SPASH, 2010).

As fontes de geração renováveis dependem de fatores climáticos, como velocidade do vento e irradiação solar, que estão sujeitas às incertezas e riscos no planejamento da operação da rede. Sendo assim, necessita-se modelar os elementos da rede nos problemas de cálculo de fluxo de potência convencional e ótimo de modo a garantir soluções de planejamento e operação da rede que garantam a sua segurança e, respeitando suas restrições físicas e operacionais (ZHANG et al., 2018).

Neste trabalho, apresenta-se um modelo matemático de programação cônica de segunda ordem (PCSO), estocástico, em coordenadas retangulares, para o problema do DOGCPR para o SEP com fontes de geração de energia não renováveis e renováveis, considerando restrições físicas e operacionais. As funções objetivos consideradas no modelo são a minimização dos custos de geração, as perdas ativas no sistema de transmissão e a emissão de poluentes no meio ambiente.

Utilizando a implementação computacional do modelo matemático programado na linguagem AMPL e usando o *solver* CPLEX (ILOG, 2017) foram efetuados testes com os sistemas IEEE de 30 barras, 118 barras (CHRISTIE, 1973) e ACTIVSg200 (BIRCHFIELD et al., 2016) onde os resultados obtidos são discutidos separadamente.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fluxo de potência ótimo (FPO) é utilizado para resolver os problemas de planejamento da expansão e operação do SEP, e em função da sua aplicação, envolve um conjunto de modelos matemáticos com diferentes funções objetivos e restrições (CARPENTIER, 1962).

Na literatura existe uma vasta variedade de formulações e métodos de otimização referente ao estudo do FPO (RADZIUKYNAS; RADZIUKYNIENE, 2009). Nesta revisão bibliográfica apresentam-se os principais trabalhos publicados na literatura abordando o problema de FPO, analisados durante o desenvolvimento desta dissertação, destacando-se

suas técnicas de solução, modelos matemáticos e contribuições (FRANK; STEPONAVICE; REBENNACK, 2012; MOMOH; ADAPA; EL-HAWARY, 1999a; MOMOH; EL-HAWARY; ADAPA, 1999b).

### 1.1.1 Programação não linear (PNL)

A formulação de problemas em PNL surgiu com o trabalho de despacho econômico proposto por Carpentier (1962) e permite a solução do FPO utilizando variáveis contínuas (DOMMEL; TINNEY, 1968) e discretas.

O problema do FPO modelado de forma mais realista apresenta variáveis reais (magnitude de tensão e potências ativa e reativa, ângulos das tensões, entre outras) e discretas (chaveamento de banco de capacitores, chaveamento dos *taps* dos transformadores, entre outras), sendo um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM).

A principal vantagem da formulação do FPO através de PNLIM é que, realmente, o modelo de FPO é não linear e sua solução exata poderia fornecer soluções que descrevam o comportamento do SEP. No entanto, o modelo de FPO é não convexo, apresentando diversas soluções ótimas locais. Portanto, sua convexificação e solução exigem um considerável esforço teórico e computacional (JABR, 2008).

Na literatura encontram-se propostas de solução do problema do FPO formulado como um modelo de PNLIM utilizando técnicas de otimização clássicas e meta-heurísticas para sua solução. Nesta abordagem híbrida o FPO convencional com variáveis reais é resolvido através de técnicas clássicas de otimização e as meta-heurísticas determinam os valores das variáveis discretas (SUBBARAJ; RAJNARAYANAN, 2009).

A seguir destacam-se os principais trabalhos de solução do problema de FPO modelados utilizando PNL ressaltando suas contribuições, métodos utilizados e principais características.

Em Dommel e Tinney (1968) propõe-se a formulação de PNL para o problema de FPO buscando minimizar o custo de geração de energia e a perda de potência ativa no sistema elétrico. Para a solução do problema propõem o método do gradiente reduzido generalizado, juntamente com o método de Newton convencional de cálculo de fluxo de potência.

As variáveis do problema são divididas em dois conjuntos: variáveis de controle e variáveis dependentes. As restrições de desigualdade, magnitude das tensões e geração de potência reativa em barras de tensão controlada, são consideradas por meio do método de penalidade quadrática.

Este trabalho destaca-se devido sua importância e pioneirismo na área, justificando seu uso como referência em diversas pesquisas do problema do FPO posteriores. A principal limitação deste estudo é o cálculo do tamanho do passo utilizado, já que para passar

muito pequenos observa-se a demora na convergência e para passos muito grandes nota-se a dificuldade de convergência em torno da solução ótima.

O trabalho de [Sasson, Vilorio e Aboytes \(1973\)](#) busca acelerar a convergência do método de Newton na minimização do custo de geração de energia e perdas ativas no sistema de transmissão empregando os algoritmos de Powell e Fletcher-Powell. A ideia deste método consiste em transformar o problema restrito em irrestrito, minimizando, assim, uma função auxiliar composta pela função objetivo e nas restrições de igualdade e desigualdade penalizadas.

A matriz hessiana do método de Newton sofre a influência dos fatores de penalidade. Logo, para valores elevados de fatores de penalidade, ela pode se tornar mal condicionada.

Esta nova modelagem apresenta uma grande redução no tempo computacional e pode ser aplicada à análise do despacho econômico, caso sejam considerados modelos com apenas variáveis contínuas.

[Billinton e Sachdeva \(1972\)](#) propõem uma formulação de PNL associada ao algoritmo de Fletcher-Powell e ao método de penalidades para solução do problema de FPO. Neste trabalho, os autores efetuaram a minimização dos custos de geração e perdas nas linhas de transmissão.

No modelo de custos de geração consideram-se gerações térmica (custo não linear) e hidroelétricas (custo linear). No entanto, a principal crítica deste trabalho está na limitação em efetuar a otimização de potência reativa considerando ambos os tipos de geração.

[Shoults e Sun \(1982\)](#) propõem a formulação do problema de FPO utilizando o desacoplamento das potências ativa (P) e reativa (Q). Com relação ao subproblema P, minimiza-se o custo horário de energia elétrica controlando a produção dos geradores e *taps* dos transformadores, enquanto que no subproblema Q minimiza-se as perdas ativas do sistema, controlando o nível de tensão dos geradores e *taps* dos transformadores.

Os subproblemas P e Q são sujeitos às restrições de segurança da rede, como limites das magnitudes das tensões nas barras, capacidade de transferência de potência, entre outras restrições.

O principal avanço apresentado neste trabalho consiste na capacidade de resolver problemas de grande porte em um tempo computacional pequeno, muito útil para operações online. Entretanto, para solucionar problemas de grande porte, primeiramente, necessita-se de um ponto inicial e, caso não se conheça um ponto inicial factível, deve-se acrescentar uma função de penalidade à função objetivo do problema.

[Burchett, Happ e Wirgau \(1982\)](#) apresentam um método de programação quadrática (PQ) para a formulação e solução do problema do despacho econômico do FPO, minimizando o custo de geração, perdas ativa-reativa e alocação de novos capacitores

*shunt*.

Este novo método destacou-se em relação aos algoritmos propostos anteriormente, devido à redução do seu tempo computacional e robustez de localizar uma solução factível mesmo partindo de um ponto inicial infactível.

A principal crítica referente ao estudo de [Burchett, Happ e Wirgau \(1982\)](#) está em sua incapacidade de decidir quais restrições devem, ou não, se tornar ativas a cada iteração.

[Burchett, Happ e Vierath \(1984\)](#) publicaram uma extensão do artigo anterior propondo a formulação do problema de FPO através de programação quadrática PQ capaz de determinar quais restrições não estão ativas durante a convergência do algoritmo.

[Sun et al. \(1984\)](#) utilizam uma formulação explícita do método de Newton para solução do problema de FPO. O conjunto de restrições de desigualdade é separado em dois grupos: restrições penalizadas, introduzidas na função objetivo através de termos de penalidade quadráticos, e restrições ativas na solução, incorporadas ao conjunto de restrições de igualdade do problema.

A solução do problema é obtida quando as condições de otimalidade de Karush-Khun-Tucker estão satisfeitas, e a solução das equações do fluxo de potência convencional estão dentro de uma tolerância preestabelecida. O método apresenta convergência de segunda ordem e tem como dificuldade a necessidade de identificar as restrições de desigualdade que estão ativas a cada iteração. O método, tanto a versão acoplada como a desacoplada, foi testado em um sistema de 912 barras.

[Lebow et al. \(1985\)](#) formulam o problema de planejamento e despacho ótimo de reativos, FPO reativos, através de um modelo de PNLIM propondo para sua solução a técnica da decomposição hierárquica de *Benders*.

O PNLIM é dividido em dois subproblemas: *i*) operação através da formulação e solução do problema do FPO para fazer o despacho de potência reativa e ajustes dos equipamentos de controle de tensão; e *ii*) investimentos para alocação ótima de fontes de potência reativa na rede, através de um problema de programação linear inteiro misto (PLIM).

Ambos os níveis são sujeitos às restrições não lineares (nível *i*), lineares inteiras mistas (nível *ii*) e restrições lineares (níveis *i* e *ii*).

[Rehn, Bubenko e Sjelvgren \(1989\)](#) propõem a técnica lagrangeana aumentada e método Quase-Newton para a solução do problema de otimização da regulação de tensão com as mesmas características de convergência do método Han-Powell e capaz de determinar quais restrições estão, ou não, ativas.

Este trabalho pode ser comparado com o método do gradiente reduzido generalizado



que possui uma partição estratégica para variáveis de controle e estado, e informações de segundo ordem, possibilitando a localização de uma solução ótima a partir de um ponto inicial infactível.

As principais críticas deste trabalho consistem na ausência do controle de *taps* dos transformadores no modelo, apresentação de uma abordagem fraca do fator de sensibilidade do problema devido às linearizações das equações estáticas de fluxo de potência e ausência de estudos comparativos.

Granville (1994) propõe a formulação do problema de despacho ótimo de potência reativa através de um modelo de PNL e solucionado utilizando o método dos pontos interiores (MPI) primal-dual.

A função objetivo considerada neste estudo busca minimizar tanto o custo de injeção de potência reativa necessária para manter as restrições de operação do sistema elétrico factíveis, quanto o custo de perda de potência ativa na rede, satisfazendo os conjuntos de restrições físicas, operacionais e de segurança do SEP.

As principais contribuições deste artigo são: *i*) aplicação para simulação de sistemas elétricos reais de grande porte; *ii*) estabilidade numérica; e, *iii*) não há a necessidade de identificar as restrições ativas, pois elas são implicitamente consideradas no MPI.

Granville e Lima (1994) propõem uma formulação completa para o problema de planejamento de potência reativa através de uma abordagem multi-nível da decomposição de *Benders*, considerando diferentes tipos de fontes e controle de potência reativa e várias condições operacionais e de contingências da rede. Esta metodologia fornece os índices de sensibilidade para o investimento em fontes reativas para o sistema operando em condições normais ou no modo preventivo sob contingências.

Torres e Quintana (1998) formulam o problema do FPO em coordenadas retangulares de tensão e solucionam o problema utilizando MPI preditor-corretor. A função objetivo do modelo minimiza as perdas de potência ativa no sistema elétrico.

Algumas variações do problema de FPO em coordenadas retangulares têm função objetivo e algumas restrições quadráticas, que facilitam a convergência do método.

As vantagens de desenvolver a modelagem do problema do FPO em coordenadas retangulares é a facilidade da representação matricial do sistema e a eliminação das relações trigonométricas. Contudo, a principal desvantagem é a representação matemática das restrições dos limites das magnitudes de tensão nas barras. O trabalho também desconsidera a presença de variáveis inteiras e discretas na resolução do problema, entretanto os autores sugerem possíveis técnicas para analisar tais limitações.

Estevam et al. (2010) propõem um modelo de PNLIM para o problema de planejamento e despacho de potência reativa do SEP e um algoritmo Branch-and-Bound (B&B)

não linear para a sua solução.

O conjunto de variáveis inteiras e discretas são relaxadas ou fixadas em cada iteração do algoritmo de B&B e o problema de PNL é resolvido utilizando o MPI primal-dual. A principal contribuição de [Estevam et al. \(2010\)](#) é o desenvolvimento de um algoritmo de B&B capaz de resolver diretamente o problema de PNLIM, usando critérios de sondagem adaptados para este tipo de problema.

### 1.1.2 Programação convexa (PC)

A formulação do problema do FPO utilizando modelos convexos e lineares é atraente, pois utiliza métodos de resolução bem desenvolvidos (simplex e suas variações) que solucionam os problemas com rapidez, eficiência, excelente convergência e, principalmente, garantem a obtenção de soluções ótimas globais.

A formulação do problema do FPO em SEPs complexos através do modelo de PC pode apresentar dificuldades de precisão nos resultados obtidos pois a solução ótima global da formulação convexa dependendo das simplificações adotadas no modelo original, desta forma, pode não ser igual à solução ótima do problema de PNL ([MOMOH et al., 1997](#)). Contudo, os modelos de PL e convexos são amplamente utilizados na resolução do problema do FPO e apresentando soluções satisfatórios ([IBA, 1994](#); [MANTOVANI](#); [MODESTO](#); [GARCIA, 2001](#); [JABR, 2007](#); [MOLZAHN et al., 2013](#); [MOLZAHN](#); [HISKENS, 2015](#)) ressaltando que os modelos de PC apresentam maior complexidade computacional em relação aos modelos de PL.

A modelagem do FPO convexo, semelhante à formulação do problema do FPO utilizando a modelagem de PNL, permite adotar as variáveis discretas e inteiras da rede, tornando o modelo mais realista, complexo e caracterizando um modelo de PLIM ou programação convexa inteira mista (PCIM).

Na literatura também se observa a utilização de meta-heurísticas para reduzir a complexidade computacional do problema do FPO formulado segundo um modelo de PC (metodologia híbrida).

A seguir destacam-se os principais trabalhos que abordam o problema do FPO modelados utilizando PC, destacando-se suas contribuições, métodos utilizados e principais características.

[Wells \(1968\)](#) formula o problema de FPO utilizando uma modelagem de PL para determinar o despacho econômico do sistema de potência respeitando as restrições de segurança e carregamento da rede. Neste trabalho as equações do custo de geração de energia e as restrições de balanço da rede são linearizadas e o modelo de PL resultante é resolvido por meio do método Simplex.

Esta abordagem utilizando o método de PL apresenta problemas de precisão entre

as soluções do problema original e do problema linearizado, principalmente com relação ao controle de potência reativa e tensão.

[Nabona e Freris \(1973\)](#) apresentam um método de PL e PQ para a otimização do problema de despacho econômico buscando minimizar as perdas de potência ativa na rede (PL), custo de geração de energia e potência reativa (PQ ou PL).

Este método está fundamentado na técnica de cálculo do fluxo de potência de Newton-Raphson e nas restrições dos fluxos de potência linearizadas. A principal vantagem deste estudo é sua capacidade de obter soluções ótimas partindo de pontos iniciais infactíveis, além de fornecer um fácil controle dos limites das variáveis dependentes.

[Stott e Hobson \(1978a\)](#), [Stott e Hobson \(1978b\)](#) propõem a solução do problema de FPO através de um algoritmo de PL especializado, considerando o alívio de sobrecarga na rede por meio do controle de potência ativa.

O alívio de sobrecarga consiste em estabelecer como critério de prioridade o redespacho de geração de potência ativa; controle de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão em corrente contínua, controle de fluxo em linhas para evitar possíveis sobrecargas do sistema operando em estados de emergência; controle de transformadores defasadores e corte de carga.

Estas ações de controle são representadas analiticamente como injeções de potência ativa nas barras de geração, ou seja, como variações das gerações equivalentes.

A metodologia proposta aplica-se aos sistemas de grande porte; controle de infactibilidades utilizando métodos heurísticos, entre outras características. A principal limitação desta metodologia consiste na linearização das funções objetivo, das restrições e sua inadequação para considerar o subproblema reativo.

[Stadlin e Fletcher \(1982\)](#) propõem um modelo que utiliza a injeção de corrente para o controle de tensão e despacho de potência reativa em um SEP.

O modelo é linear e o problema do FPO é resolvido utilizando uma técnica de PL e desenvolve a decomposição do equacionamento do fluxo de carga típico em componentes de potência reativa e níveis de tensão, possibilitando a modelagem de diversos dispositivos elétricos pelo modelo de corrente (*tap* dos transformadores, entre outros).

A limitação observada neste trabalho é sua dependência com o nível de detalhamento com a modelagem das cargas do sistema analisado, como é observado pela falta de exatidão dos coeficientes de sensibilidade utilizados no estudo quando um dado sistema possui um transformador saturado sem a definição de sua impedância de magnetização.

[Mota-Palomino e Quintana \(1986\)](#) propõem um algoritmo baseado na modelagem das equações da rede através de PL, utilizando o método de penalidade para resolver o problema de despacho de potência reativa.

Neste algoritmo permite-se várias violações de restrição simultaneamente, as quais são solucionadas utilizando técnicas do método dual de PL, quando possível. Caso contrário, o algoritmo localiza o ponto factível da restrição mais próxima.

Neste trabalho não são adotados as variáveis discretas (*tap* dos transformadores, chaveamento de dispositivos *shunts*, entre outros) e apresenta uma modelagem linear incompleta para a análise de sensibilidade linear do algoritmo de PL.

Contaxis, Delkis e Korres (1986) formulam o problema do FPO como modelos de PL e PQ para otimizar tanto o custo de geração, quanto as perdas do sistema. Neste trabalho, as restrições não lineares de fluxo de potência convencional são linearizadas utilizando a técnica da matriz-Z e análise de sensibilidade.

Mantovani, Modesto e Garcia (2001) formulam o problema de planejamento e despacho ótimo de reativos como um modelo de PLIM e propõem para sua solução um algoritmo misto (PL sucessiva e algoritmo genético).

O problema original é relaxado para um problema de PL onde as variáveis discretas e inteiras são fixadas através de cada um dos indivíduos de um algoritmo genético. Sendo assim, para cada indivíduo do algoritmo genético o modelo de PL equivalente é resolvido aplicando o método de PL sucessiva (interações entre os algoritmos de fluxos de potência e PL).

Desta forma o algoritmo de PL sucessiva resolve o problema de despacho de reativos e o algoritmo genético simples resolve o problema de otimização do ajuste das variáveis discretas e das ações de investimentos necessárias para adequar as necessidades de reativos para manter o sistema operando com qualidade das magnitudes de tensão nos diferentes cenários de operação.

Jabr (2007) propõe o equacionamento do problema de fluxo de carga desenvolvido para sistemas radiais (JABR, 2006) para sistemas malhados, através de um modelo de PCSO resolvido utilizando um MPI que possui complexidade computacional polinomial.

As restrições do modelo são as equações de fluxo de potência representadas como funções trigonométricas dos ângulos e das magnitudes de tensões nas barras.

A principal contribuição deste trabalho é a comprovação da eficiência do modelo de PCSO, de forma similar ao método de PL, em sistemas elétricos de complexidade semelhantes.

O objetivo deste trabalho é analisar a eficiência do equacionamento do fluxo de carga em sistemas malhados baseando-se na modelagem de sistemas radiais, logo, os autores não desenvolveram uma modelagem completa para o problema.

Jabr (2013) propõe o modelo de otimização do planejamento do sistema de transmissão AC considerando as variáveis reais (magnitude de tensão e ângulo dos barramentos,

entre outros) e as variáveis discretas (*tap* dos transformadores, entre outros) da rede via relaxações cônicas semi-definidas nas restrições do FPO. Este modelo de PCIM é resolvido utilizando um algoritmo de B&B.

## 1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho são propostos os modelos matemáticos de programação cônica de segunda ordem multiobjetivos para o problema de DOGCPR determinístico e estocástico, considerando a natureza estocástica das variáveis aleatórias (condições climáticas, níveis de demanda, entre outras) da rede. Nestes modelos minimizam-se os custos de geração, perdas ativas da linha de transmissão do sistema e emissão de gases poluentes no meio ambiente. As restrições de segurança e operação do SEP são consideradas, destacando as variáveis de controle das relações de transformação dos transformadores e das fontes de geração de potência reativa. Os modelos são programados em linguagem AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) e resolvidos através do *solver* comercial CPLEX (ILOG, 2017). Os sistemas testes IEEE30, IEEE118 e ACTIVSg200, cujos dados estão disponíveis no Anexo (A), são solucionados e discutidos, permitindo a ratificação dos modelos desenvolvidos.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo apresenta-se uma breve introdução do problema DOGCPR, acompanhada de uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos publicados relacionados ao estudo e aos objetivos desta pesquisa.

No Capítulo 2, apresentam-se as formulações gerais do problema do DOGCPR considerando os aspectos teóricos do SEP e de seus componentes.

No Capítulo 3, apresentam-se os conceitos da otimização convexa com ênfase no método de PCSO.

No Capítulo 4, encontram-se as formulações do problema de DOGCPR multiobjetivo determinístico e estocástico modelados utilizando PCSO, considerando a natureza estocástica das fontes de geração renováveis e da demanda do sistema analisadas utilizando a estratégia de blocos de tempos.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados e discussões obtidos para os sistemas testes analisados, a partir da implementação computacional dos modelos desenvolvidos. Os resultados obtidos pelo modelo determinístico foram comparados com as soluções fornecidas pelo *software* MATPOWER®, para validar o modelo convexo proposto neste trabalho. Os resultados obtidos por meio do modelo estocástico desenvolvido considera o período de um ano (8760 horas) adotando diferentes cenários de operação, níveis de demanda, condições climáticas, entre outros fatores.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões dos modelos desenvolvidos em função dos resultados obtidos, juntamente com as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas e anexos utilizados ao longo deste trabalho. No Anexo (A) são apresentados a topologia, parâmetros de ramo, de barra e dados utilizados na análise estocástica dos sistemas testes IEEE30, IEEE118 e ACTIVSg200. No Anexo (B) são apresentados os níveis de demanda horário para as regiões brasileira.

## 2 FORMULAÇÃO GERAL DO DOGCPR

Neste capítulo é apresentada a formulação do problema de FPO considerando os tipos de funções objetivos, restrições, variáveis, entre outros aspectos.

O problema do FPO pode ser formulado, de forma geral, como um problema de PNL, conforme (1) (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994; SILVA, 2018; FRANK; STEPONAVICE; REBENNACK, 2012).

$$\min f(u, x) \tag{1a}$$

s.a.

$$g(u, x) = 0 \tag{1b}$$

$$h(u, x) \leq 0 \tag{1c}$$

onde (1a) representa a função objetivo (FO). Para problemas mono-objetivos, tem-se apenas funções escalares  $f$ , enquanto que para problemas multi-objetivo tem-se um vetor de funções.

As funções vetoriais  $g(u, x)$  e  $h(u, x)$  representam as restrições de igualdade e desigualdade do problema de FPO, respectivamente, as quais são funções das variáveis  $u$  e  $x$ .

As variáveis dependentes  $x$  representam as variáveis de estado do sistema elétrico que são contínuas (nível de tensão de um barramento, ângulo de tensão de um barramento, entre outras variáveis) (CARPENTIER, 1962; DOMMEL; TINNEY, 1968; SUN et al., 1984). As variáveis de  $u$  fazem parte do subgrupo de variáveis de controle (ajustes de *taps* dos transformadores, ajustes dos dispositivos chaveados, magnitude de tensão em barras de tensão controlada), que podem ser contínuas ou discretas.

Devido à vasta variedade de variáveis de controle consideradas na literatura, a Figura (1) apresenta as principais variáveis de controle adotadas de acordo com a proposta do problema FPO.

Figura 1 – Principais variáveis de controle e dependente utilizadas em trabalhos da literatura

Variável	Natureza do problema	Tipo	Referência
Controle	Geração de potência real e imaginária	Contínua	(GOMEZ et al., 1991)
	Regulação do nível de tensão	Contínua	(GOMEZ et al., 1991)
	Configuração do <i>tap</i> do transformador	Discreto	(GOMEZ et al., 1991)
	Chaveamento de dispositivos shunt	Binário	(JABR, 2010)
	Controle FACTS	Contínuo e Discreto	(AZEVEDO et al., 2010)
Estado	Magnitude de tensão no barramento	Contínuo	(GOMEZ et al., 1991)
	Ângulo da tensão do barramento	Contínuo	(CHEN et al., 2001)
	Componente real e imaginária da tensão	Contínuo	(TORRES; QUINTANA, 1998)
<b>Fonte:</b> Adaptado de Frank, Steponavice e Rebennack (2012)			

O principal tipo de FO utilizado nos estudos do problema de FPO é a minimização do custo de geração de energia elétrica considerando, ou não, a perdas ativas no SEP.

Os trabalhos que utilizam o custo de geração das unidades térmicas, geralmente, utilizam curvas de custo quadráticos ou por custos linearizados por partes (MATPOWER, 2019).

Na Figura (2), apresentam-se as principais FOs utilizadas na literatura.

Figura 2 – Principais funções objetivo utilizadas na literatura

FO	Referência
Custo de geração total	(BURCHETT et al., 1982; DOMMEL; TINNEY, 1968)
Perdas no sistema elétrico	(MOMOH, 1989; GOMEZ et al., 1991)
Capacidade de transferência de Potência	(CHEN et al., 2001)
Custo de investimentos em reativos	(RAMOS; VALLEJOS; BARÁN, 2014)
Perfil de tensão ótima	(RAMOS; VALLEJOS; BARÁN, 2014)
Carregamento do sistema	(ROSEHART; SCHELLENBERG; ROMAN, 2006)
<b>Fonte:</b> Adaptado de Frank, Steponavice e Rebennack (2012)	

A restrição (1b) corresponde às equações do balanço do fluxo de potência ativa e reativa na rede, as quais devem respeitar as duas leis de Kirchhoff.



A representação das restrições do balanço de potência AC é normalmente escrita na formulação polar, conforme o (2) (GOMEZ-EXPOSITO; CONEJO; CANIZARES, 2018), onde se verificam, para os sistemas de alta tensão, os acoplamentos fortes: *i*) Potência ativa e o ângulo de tensão; e, *ii*) Potência reativa e o módulo da tensão do sistema elétrico.

$$P_i = V_i \sum V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (2a)$$

$$Q_i = V_i \sum V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (2b)$$

sendo  $V_i$  a magnitude de tensão no barramento  $i$ ;  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$  os elementos da matriz de admitância de barras, referentes à condutância e susceptância, respectivamente, entre os barramentos  $i$  e  $j$ ; e  $\theta_{ij}$  a diferença do ângulo de fase das magnitudes das tensões dos barramento  $i$  e  $j$ .

Na literatura encontram-se trabalhos (TORRES; QUINTANA, 1998; LÓPEZ, 2014) que utilizam a representação das restrições do balanço de potência AC no sistema de coordenadas retangulares, que não usam funções trigonométricas na sua formulação, como é apresentado no conjunto (3).

$$P_i = e_i \sum (G_{ij} e_i - B_{ij} f_i) + f_i \sum (B_{ij} e_i + G_{ij} f_i) \quad (3a)$$

$$Q_i = -e_i \sum (B_{ij} e_i + G_{ij} f_i) + f_i \sum (G_{ij} e_i - B_{ij} f_i) \quad (3b)$$

sendo  $e_i$  e  $f_i$  as componentes real e imaginária, respectivamente, da tensão  $V_i$  do barramento  $i$ , conforme  $V_i = e_i + j f_i$ , onde  $j$  indica o operador associado a números complexos.

Por outro lado, a restrição (1c) corresponde aos limites das variáveis de controle e dependentes do SEP (restrições de desigualdade).

Na Figura (3) são apresentadas as principais restrições de igualdade e desigualdade utilizadas nas formulações do problema de FPO segundo alguns trabalhos da literatura.

Figura 3 – Principais restrições presentes na literatura

Tipo	Restrição	Referência
Igualdade	Fluxo de potência AC	(GAN; THOMAS; ZIMMERMAN, 2000; ROSEHART; SCHELLENBERG; ROMAN, 2006)
	Fluxo de potência AC desacomplado	(BURCHETT et al., 1982)
	Limite de segurança de estabilidade de tensão	(ALSAC; STOTT, 1974)
Desigualdade	Limite de geração de potência ativa e reativa	(GAN; THOMAS; ZIMMERMAN, 2000)
	Restrições de demanda	(MOMOH, 1989)
	Limites de magnitude de tensão nas barras	(GAN; THOMAS; ZIMMERMAN, 2000; DOMMEL; TINNEY, 1968)
	Limite de fluxo de potência aparente nas linhas de transmissão e transformadores	(CHEN et al., 2001)
	Limite dos dispositivos de controles de reativo	(ZHANG; REN, 2005)
<b>Fonte:</b> Adaptado de Frank, Steponavice e Rebennack (2012)		

## 2.1 FONTES DE POTÊNCIA REATIVA

Nesta subseção são descritos, de forma concisa, as características físicas, operacionais e econômicas das fontes de potência reativa adotadas na formulação do problema do DOGCPR.

As fontes de reativos dinâmicas são compostas de custos fixos variáveis relativamente maiores quando comparadas às fontes de característica estática. No entanto, é importante observar que, apesar dos custos reduzidos, as fontes estáticas não possuem a capacidade de prestar serviços de controle de tensão e, conseqüentemente, perdem capacidade de injeção de reativos em condições de tensão reduzida.

Geralmente, utilizam-se as fontes reativas estáticas próximas dos locais onde há necessidade de reativos e, somente quando não há alternativa, as necessidades de reativos são supridas à distância, ocasionando elevação nas correntes e quedas de tensão nas linhas de transmissão.

Na Tabela (1) são apresentadas as características de velocidade de resposta para algumas das principais fontes de reativos, assim como seus respectivos custos fixos e variáveis, de acordo com Echeverri (2011).

Tabela 1 – Características das principais fontes de potência reativa

Fonte	Tipo de resposta	Velocidade de resposta	Custo Fixo
Gerador síncrono	Continua	Rápida	Elevado
Condensadores síncrono	Continua	Rápida	Elevado
Bancos de capacitores	Discreta	Lenta	Baixo
Bancos de reatores	Discreta	Lenta	Alto
Dispositivos FACTS	Continua	Rápida	Moderado

**Fonte:** ([ECHEVERRI, 2011](#))

Os geradores síncronos, além de serem os principais equipamentos utilizados no controle de tensão, visto que em condições normais as tensões em seus terminais permanece constante, também são essenciais para o fornecimento de potências ativa e reativa. Devido a tais características, estes geradores representam a maior parte dos geradores utilizados na indústria de geração de energia elétrica.

Caso o gerador síncrono esteja conectado em uma barra em condição de subtensão, sua produção de potência reativa pode exceder os limites de corrente de campo e/ou corrente de armadura (limitações térmicas) e, conseqüentemente, a tensão em seus terminais não poderá ser mantida constante ([KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994](#)).

Em condições normais de operação, a geração de potência reativa dos geradores necessita do mínimo incremento de potência ativa ou combustível do sistema, fator que favorece o equipamento já que seu custo é dependente do tipo de combustível, seu nível de tensão e capacidade de geração. Os geradores também são desenvolvidos para gerar uma considerável quantidade de potência reativa em tempo reduzido devido às limitações térmicas e ao tempo para alcançar seu ponto de degradação.

A capacidade de geração de potência reativa, no entanto, se reduz em função de um aumento da produção de potência ativa, visto que a produção de potência total (potência aparente) da máquina é limitada pela sua curva de *capabilidade*. Desta forma, a limitação de produção de potência ativa (faturada) em virtude de um aumento na geração de reativos pode incorrer nos chamados custos de perda de oportunidade, minimizando o faturamento do proprietário da unidade geradora.

Nas formulações do problema do DOGCPR encontradas na literatura tanto os geradores síncronos quanto os condensadores síncronos são modelados como variáveis contínuas, considerando o despacho de potência ativa como conhecido. Também se adota a independência entre o despacho de potência ativa e os limites de geração de potência reativa, de modo a desconsiderar os custos de oportunidade do problema.

Os condensadores são caracterizados como uma máquina síncrona operando em vazio e destinado somente para controle de potência reativa, além de apresentar uma elevada resposta às variações de níveis de tensão, o que justifica seu uso na manutenção da

estabilidade de tensão e operar em situações críticas, dada a sua capacidade de suportar sobrecargas momentâneas. Apesar dos benefícios de operação, estas máquinas possuem elevados custos de manutenção e tempo de uso limitado no sistema elétrico.

Os bancos de capacitores *shunt* são fontes estáticas e discretas de potência reativa extremamente utilizados no despacho e planejamento do sistema elétrico. Eles podem ser encontrados tanto em configurações fixas quanto disposto em bancos em série ou em paralelo, o que possibilita diversas combinações de ligações, como é visto para os capacitores comutados ou variáveis.

Os bancos de capacitores *shunt* são normalmente acionados para fornecer suporte de tensão via injeção de potência reativa quando o sistema sofre com períodos de elevado carregamento.

A perda operacional associada aos capacitores variáveis é muito baixa visto que tais dispositivos estão conectados à rede mediante chaves mecânicas ou disjuntores. Contudo, o fornecimento de potência reativa dos capacitores é correspondente ao quadrado da tensão que os alimenta, resultando em uma elevada sensibilidade às variações de tensão.

Geralmente, as subestações dispõem de bancos de capacitores interconectados em blocos, sendo que os capacitores comutados não apresentam muita precisão no ajuste de potência reativa devido ao chaveamentos mecânicos atrasado pelos ciclos de acionamento. Portanto, não se aconselha a utilização de bancos de capacitores variáveis em situações de instabilidade transitória.

Os bancos de capacitores possuem custos de manutenção consideravelmente baixos e seu custos unitários são inferiores à média dos demais componentes de compensação de reativo. Sua modelagem matemática para a operação deve considerar cada elemento que compõe o banco como variáveis discretas.

De modo oposto aos bancos de capacitores *shunt*, bancos de reatores ou indutores *shunt* são utilizados para drenar potência reativa da rede e bastante utilizados para compensar os efeitos capacitivos das longas linhas de transmissão de altas tensões durante períodos de carga leve para mitigar problemas de sobretensão.

Eles podem estar dispostos em configurações fixas ou em bancos, fornecendo um ajuste fino de sua capacidade conforme a condição de carga do sistema.

Os bancos de reatores podem ser ligados ao sistema elétrico de duas formas diferentes: *i*) ligados diretamente à linha de transmissão, onde constituem parte do sistema de transmissão e variam com a capacidade de fornecimento de reativo via chaveamento de manobra resultando em picos de tensão; e *ii*) conectados ao terciário do transformador, onde são coordenados pela comutação automática.

Os custos dos bancos de reatores *shunt* são superiores aos custos dos compensadores

*shunt*, visto que seus valores variam de acordo com a capacidade de fornecimento e dispositivos de controle e proteção.

Os transformadores com controle de *tap* são dispositivos eletromagnéticos aplicados na transferência de potência de um nível de tensão para outros níveis e são caracterizados pela característica indutiva. Uma de suas finalidades mais importantes consiste na alteração dos níveis de tensão do sistema de transmissão para os níveis de tensão utilizados na distribuição.

O controle dos *taps* possui o papel de modificar a relação de transformação de tensão dentro de uma faixa de variação. Tais modificações permitem tanto o controle quanto a redistribuição do fluxo de potência reativa, o que proporciona a melhoria do perfil de tensão do sistema elétrico.

A combinação entre o valor adequado dos *taps* dos transformadores associados com outros equipamentos para compensação de reativo permite uma maior flexibilidade de controle dos níveis de tensão do sistema.

Sendo assim, após o ajuste de comutação dos *taps* dos transformadores pode-se efetuar a otimização das fontes de reativos presentes no sistema. Consequentemente, o modelo utilizado para descrever o comportamento dos *taps* é descrito utilizando variáveis discretas.

O *tap* do transformador pode ser controlado de duas formas: *i*) pelo modo automático, onde se observa a divergência temporal entre o tempo de envio do sinal de controle e a comutação do *tap*, limitando-o apenas para controle de pequenas e médias perturbações na rede; e *ii*) pelo modo manual, o qual deve ser planejado mediante um maior espaço de tempo para sua análise de controle.

Calovic (1984), Acha, Ambriz-Perez e Fuerte-Esquivel (2000) constataram que o número de passos presentes nos transformadores igual a 32 passos, sendo  $\pm 16$  mais um passo neutro "0". O custo da incorporação do comutador de *tap* na etapa de projeto/construção é pequeno quando comparado com o valor da instalação do transformador ao sistema elétrico, contudo a troca entre os degraus pode demorar alguns segundos e gerar o risco da comutação errônea da posição do *tap*.

As linhas de transmissão apresentam propriedades capacitiva (fontes de potência reativa) e indutiva (drenos de potência reativa). Em cargas do tipo SIL (surge impedance loading), a energia reativa proveniente da capacitância da linha é igual à potência reativa absorvida pela indutância da linha, caracterizando um balanço natural de potência reativa.

Sendo assim, caso uma linha apresente cargas SIL muito carregado, essa consumirá energia reativa, contudo, caso disponha de baixo carregamento ocorrerá o oposto. Desta forma, é imperativo a consideração da capacidade reativa disponível pela linha de transmissão no decorrer do estudo de despacho ótimo de reativo ao resolver o problema do

fluxo de potência.

Linhas de transmissão de alta tensão são normalmente longas e altamente capacitivas, uma vez que a geração de potência reativa presente na linha está associada com seu nível de tensão enquanto que seu consumo de energia reativa é proporcional ao quadrado da corrente que flui por ela.

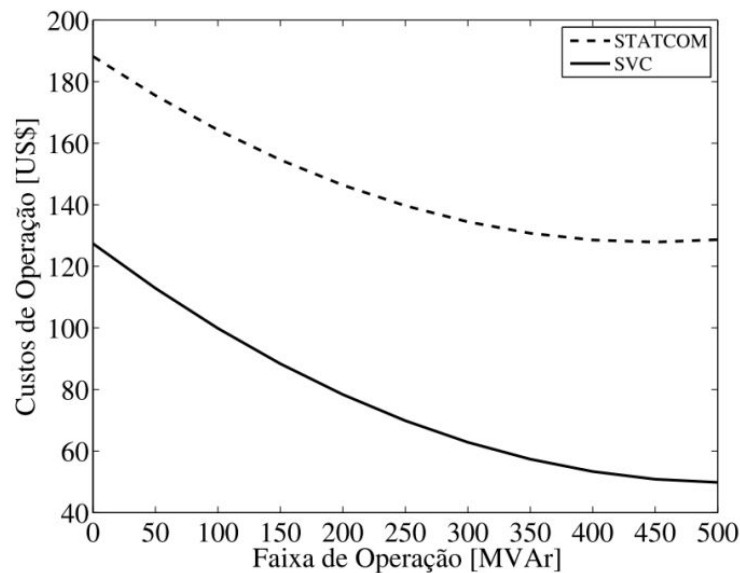
Os sistemas de transmissão flexíveis de corrente alternada (FACTS), são equipamentos baseados em eletrônica de potência projetados para corrigir os problemas de estabilidade de tensão e capacidade de transmissão do sistema via controle de tensão, angular, impedância e corrente.

Os dispositivos FACTS são importantes opções de amortecimento eficiente às variações eletromecânicas de baixas frequências, além de dispor de rápida resposta, como visto nos dois principais componentes: *i*) compensador estático de reativos (SVC); e *ii*) compensador síncrono estático (STATCOM).

Os dispositivos FACTS necessitam de manutenção inferior ou equivalente aos bancos de capacitores/reatores. Contudo, seus custos operacionais são de duas a três vezes superiores aos observados nos dispositivos *shunt* convencionais, além de introduzirem componentes harmônicas no sistema e necessitarem de filtros.

Na Figura (4) são ilustradas as curvas de custo operacional dos dispositivos SVC e STATCOM (LÓPEZ, 2014).

Figura 4 – Custos de operação do SVC e STATCOM



Fonte: (LÓPEZ, 2014)

O termo estático do SVC se refere ao fato do dispositivo possuir apenas componentes estáticos, não rotativos. Geralmente, o equipamento é ligado a uma dada barra da rede por meio de um sistema de controle que frequentemente efetua repetidas comparações

entre a tensão do barramento com sua referência e, a partir de tal diferença de tensão, introduz ou remove energia reativa do sistema buscando controlar o nível de tensão.

Os principais componentes presentes no SVC são: *i*) compensadores chaveados por tiristores (TSC); *ii*) compensadores chaveados por reatores (TSR); e *iii*) compensadores controlados por tiristores (TCR).

O STATCOM, além de executar a regulação da tensão na qual é conectado, também opera de modo semelhante a uma fonte reativa conectada em configuração “*shunt*” com a linha de transmissão (via transformador), admitindo rápidas sobrecargas com respostas muito velozes. Dessa forma, pode ser instalado em regiões industriais muito carregadas com cargas majoritariamente compostas de motores de indução.

O STATCOM assemelha-se a um compensador síncrono, contudo, sem a inércia mecânica. Logo, pode-se dizer que o STATCOM apresenta desempenho superior ao SVC.

## 2.2 FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DO DOGCPR

A formulação do problema de despacho ótimo de geração com controle de potência reativa para o SEP formados com  $\mathbf{B}$  barras e  $\mathbf{R}$  ramos, onde os índices  $i, j \in \mathbf{B}$ , indicam os barramentos do sistema, enquanto que os índices  $ij \in \mathbf{R}$  representam os ramos entre os barramentos  $i$  e  $j$ , respectivamente, está apresentada no conjunto de equações (4).

O principal objetivo deste problema é obter o ponto operacional ótimo que satisfaça as restrições físicas e operacionais pre-estabelecidas. Semelhante aos modelos clássicos encontrados na literatura, a formulação do problema do DOGCPR apresentada em (4) minimiza o custo horário de geração de potência ativa de geradores térmicos.

$$\min : \sum_{gt \in \mathbf{Gt}} c_{gt2} p_{gt}^2 + c_{gt1} p_{gt} + c_{gt0} \quad (4a)$$

s.a

$$p_i - P_{D_i} - p_i^{inj} = 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (4b)$$

$$q_i - Q_{D_i} + q_{SH_i} - q_i^{inj} = 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (4c)$$

$$P_{gt}^{min} \leq p_{gt} \leq P_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (4d)$$

$$Q_{gt}^{min} \leq q_{gt} \leq Q_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (4e)$$

$$Q_{SH_i}^{min} \leq q_{SH_i} \leq Q_{SH_i}^{max}; \quad \forall i \in \mathbf{E}; \quad (4f)$$

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (4g)$$

$$V_i^{min} \leq v_i \leq V_i^{max}; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (4h)$$

$$T_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq T_{ij}^{max}; \quad \forall ij \in \mathbf{T}; \quad (4i)$$

onde  $c_{gt2}$ ,  $c_{gt1}$ ,  $c_{gt0}$  e  $p_{gt}$  representam os coeficientes de custos quadrático, linear, constante e a potência ativa das gerações termoeletricas, respectivamente, presentes nos barramentos

$gt \in \mathbf{Gt}$ .

Os conjuntos  $\mathbf{Gt}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{T}$  representam os conjuntos de gerações termoeletricas, barramentos, ramos, barras com fontes de potências reativas *shunts* e ramos com transformadores com controle de *taps*, respectivamente.

Na formulação (4) as restrições (4b)-(4c) representam os balanços de potências ativa e reativa, respectivamente, sendo as componentes  $p_{G_i}$ ,  $q_{G_i}$  e  $q_{SH_i}$  as variáveis de potência ativa e reativa dos geradores e fontes reativas *shunt*, respectivamente.

Os parâmetros  $P_{D_i}$  e  $Q_{D_i}$  representam as potências demandadas pelas cargas ativa e reativa, respectivamente, ligadas na rede. As componentes  $p_i^{inj}$  e  $q_i^{inj}$  representam o fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, do barramento  $i$ , segundo a relação (5) (LÓPEZ, 2014) desenvolvida no sistema de coordenadas retangulares.

$$p_i^{inj} = e_i \sum_{j \in \mathbf{B}} (G_{ij}e_i - B_{ij}f_i) + f_i \sum_{j \in \mathbf{B}} (B_{ij}e_i + G_{ij}f_i); \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (5a)$$

$$q_i^{inj} = -e_i \sum_{j \in \mathbf{B}} (B_{ij}e_i + G_{ij}f_i) + f_i \sum_{j \in \mathbf{B}} (G_{ij}e_i - B_{ij}f_i); \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (5b)$$

onde os parâmetros  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$  representam os elementos das matrizes de condutância e susceptância, respectivamente, do sistema.

As restrições (4d)-(4f) representam os limites de geração de potência ativa e reativa e os limites de fornecimento de potência reativa pelos elementos *shunt*, respectivamente, no barramento  $i$ .

A restrição (4g) representa o limite térmico de transferência de potência do ramo  $ij$ . As restrições (4h)-(4i) representam os limites de magnitude de tensão para o barramento  $i$ , e a faixa factível para o posicionamento dos *taps* do transformador conectado no ramo  $ij$ , respectivamente.

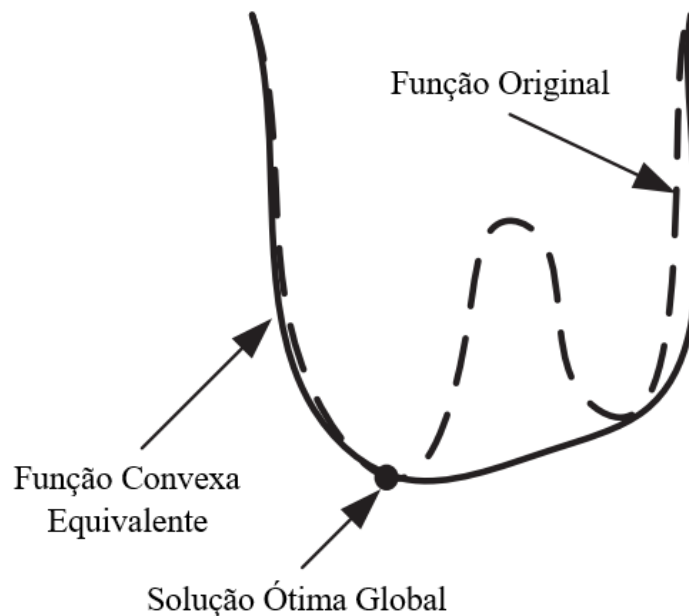
A dificuldade computacional para resolver o problema de FPO, está relacionada com o nível de detalhamento da modelagem matemática do problema físico real. Desta forma, formulações que consideram FOs, restrições não lineares, variáveis reais, inteiras e discretas tornam a resolução do problema extremamente complexa.



### 3 OTIMIZAÇÃO CONVEXA - PROGRAMAÇÃO CÔNICA DE SEGUNDA ORDEM (PCSO)

Os modelos de otimização convexa possuem uma função objetivo convexa, restrições de desigualdades convexas, restrições de igualdades afins e, principalmente, fornecer soluções ótimas globais com boa precisão para modelos originalmente não convexos. Para obter problemas convexas equivalentes é necessário que os problemas não convexas sejam devidamente relaxados, conforme ilustrado na Figura (5).

Figura 5 – Exemplo de função equivalente convexa



Fonte: (LÓPEZ, 2014)

A otimização convexa, convencionalmente, contempla o estudo e formulação de diversos tipos de problemas, dentre os quais destacam-se (em ordem de generalidade): *i)* PNL; *ii)* PC; *iii)* programação semidefinida; *iv)* PCSO; *v)* programação cônica; *vi)* mínimos quadrados; e, *vii)* PL.

Um conjunto  $S \in R^n$  é denominado convexo se para quaisquer pontos  $x_1, x_2 \in S$ , a combinação convexa destes pontos, dada pela equação (6), também pertencer a  $S$

$$x = \lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \in S \quad \lambda \in [0, 1] \quad (6)$$

Dessa forma, qualquer ponto interno ao conjunto convexo pode ser representado como em (6).

De acordo com (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 2013), dado um conjunto convexo não vazio e uma função  $f : S \rightarrow R$ , a função  $f$  é convexa caso a condição (7) seja satisfeita para todos os pontos  $x_1, x_2 \in S$  e  $\lambda \in [0, 1]$ .

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad \lambda \in [0, 1] \quad (7)$$

Caso a função  $f$  satisfaça (7) com  $x_1 \neq x_2 \in S$  e  $\lambda \in [0, 1]$ , ela é denominada *estritamente convexa*.

Dado o problema descrito em (8), sendo  $f : R^n \rightarrow S$ , uma solução factível do problema é definida como sendo qualquer ponto  $x \in S$ . Caso exista um ponto  $x^* \in S$  que apresente  $f(x) \geq f(x^*)$  para qualquer  $x \in S$ , então este  $x^* \in S$  é a solução ótima global do problema.

Para os casos em que dado  $x \in S$ , e exista  $\varepsilon > 0$ , tal que tem-se  $f(x) \geq f(x^*)$  para cada  $x \in S \cap N_\varepsilon(x^*)$ , logo  $x^*$  é denominado *ponto ótimo local* de  $f$ , onde  $N_\varepsilon(x^*)$  representa o conjunto de pontos vizinhos de  $x^*$ . Analogamente, para  $x \in S$  e  $f(x) > f(x^*)$  para todos os valores de  $x \in S \cap N_\varepsilon(x^*)$ , com  $x \neq x^*$ , então  $x^*$  é o *ponto de ótimo local estrito* de  $f$ .

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & \\ & x \in S \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.1 FORMULAÇÃO CÔNICA

Um conjunto  $C \subseteq R^n$  descreve um cone, se para qualquer ponto  $x \in C$  exista  $\lambda x \in C$  para todo  $\lambda \in R_+$ . Sendo assim, o conjunto que descreve um cone é um conjunto fechado pela multiplicação por um escalar não negativo.

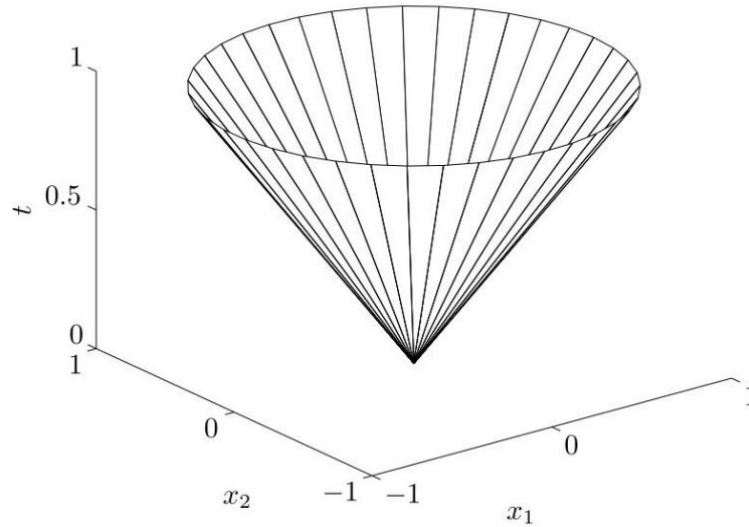
**Teorema:** Um cone  $C$  é dito convexo se, e somente se, o mesmo é um conjunto fechado sobre a adição, logo, para quaisquer  $x, y \in C$ , tem-se  $x + y \in C$  (GLINEUR, 2001).

Um cone de segunda ordem deve ser descrito na norma Euclidiana (9) com um conjunto  $C \subseteq R^{n+1}$ , sendo  $\|x\| = (x^T, x)^{(1/2)}$ .

$$C = \{(x, t) \in R^n \times R, \|x\| \leq t\} \subseteq R^{n+1} \quad (9)$$

O cone  $C$  descrito em (9) é conhecido como cone de Lorentz (LOBO et al., 1998; BOYD; VANDENBERGHE, 2004) e representado na Figura (6).

Figura 6 – Cone de Lorentz



Fonte: (BOYD; VANDENBERGHE, 2004)

A formulação cônica (10) representa um problema de programação convexa, sendo  $C \subseteq R^n$  um cone convexo com interior não vazio tal que  $C \cap -C = \{0\}$  e  $-C = \{x | -x \in C\}$ .

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x) = c^T x \\
 \text{s.a.} \quad & \\
 & Ax = b \\
 & x \in C
 \end{aligned} \tag{10}$$

A variável de otimização é  $x \in R^n$  e o conjunto de soluções do problema pertence ao cone  $C$ ,  $A$  descreve a matriz  $m \times n$ ,  $b \in R^m$  e  $c \in R^n$  (GLINEUR, 2001).

### 3.2 MODELOS DE PCSO

Os problemas PCSO são um caso particular da programação convexa, pois efetuam a otimização de uma função objetivo linear sujeita a restrições lineares e restrições do tipo cone quadrático. Desta forma, dentre os problemas de PCSO encontrados na literatura, destacam-se os problemas de programação linear, quadrática, quadrática com restrições quadrática e alguns casos de otimização convexa não linear (LOBO et al., 1998; PRUESSNER et al., 2003).

A principal vantagem de se desenvolver um problema em PCSO é a possibilidade de reformulação de qualquer problema de otimização convexa quadrática em um modelo de PCSO, como apresentado por Lobo et al. (1998), Boyd e Vandenberghe (2004).

Os problemas de otimização convexa desta natureza podem ser descritos matematicamente de acordo com a equação (11a).

$$\min f(x) = f^T x \quad (11a)$$

s.a.

$$\| Ax + b \| \leq c^T x + d \quad (11b)$$

$$Fx = g \quad (11c)$$

onde  $x \in R^n$  é a variável de decisão,  $f \in R^n$ ,  $F \in R^{m \times n}$  e  $g \in R^m$  representam a função objetivo e restrições do problema,  $b \in R^m$ ,  $d \in R^m$  e  $A \in R^{m \times n}$  são os parâmetros do modelo (GLINEUR, 2001).

## 4 MODELOS DE PCSO MULTIOBJETIVO PARA O PROBLEMA DE FPO

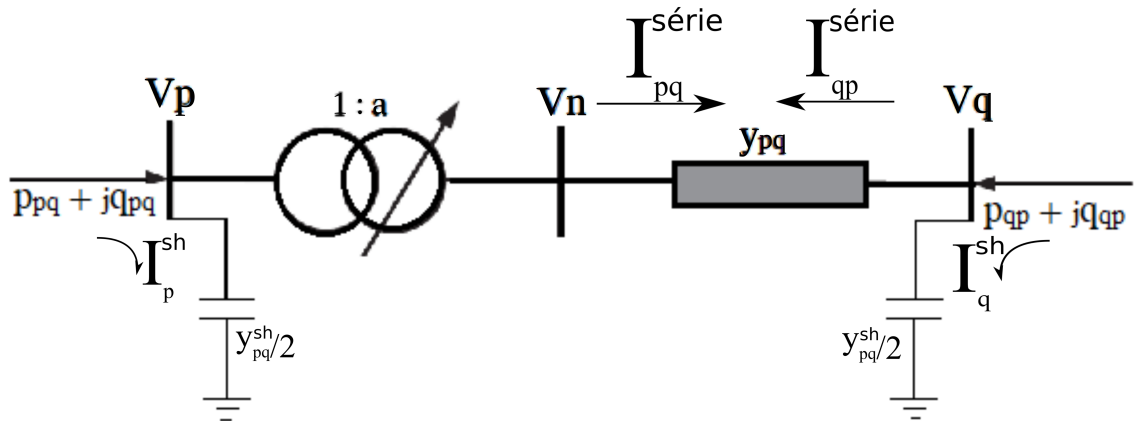
Neste capítulo, apresentam-se os modelos convexos multiobjetivos para o problema de despacho ótimo de geração e controle de potência reativa em sistemas de energia elétrica. Estes modelos contemplam tanto a natureza determinística como estocásticas das variáveis envolvidas no problema de despacho ótimo de geração e controle de potência reativa.

### 4.1 EQUAÇÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA EM COORDENADAS RETANGULARES

Seja a linha de transmissão  $pq$ , representada na Figura (7), constituída pelos parâmetros: resistência série ( $r_{pq}$ ), reatância série ( $x_{pq}$ ), a susceptância *shunt* ( $b_{pq}^{sh}$ ) e o transformador proporcional ideal com a relação de transformação  $1 : a$ . Define-se a impedância do elemento série da linha como  $z_{pq} = r_{pq} + jx_{pq}$ ; e a admitância série da linha segundo a relação  $z_{pq}^{-1} = y_{pq} = g_{pq} + jb_{pq}$ , onde os parâmetros  $g_{pq}$  e  $b_{pq}$  são a condutância série e a susceptância série, respectivamente, calculados através de (12).

$$\begin{aligned} g_{pq} &= \frac{r_{pq}}{(r_{pq}^2 + x_{pq}^2)} \\ b_{pq} &= \frac{-x_{pq}}{(r_{pq}^2 + x_{pq}^2)} \end{aligned} \quad (12)$$

Figura 7 – Linha de transmissão - modelo  $\pi$



Fonte: adaptado de [Jabr \(2008\)](#)

A relação de transformação entre as tensões e correntes dos barramentos  $p$  e  $q$  é dada por (13) e (14).

$$\frac{\dot{E}_n}{\dot{E}_p} = a \quad (13)$$

$$\frac{|\dot{I}_{pq}^{série}|}{|\dot{I}_{qp}^{série}|} = -a \quad (14)$$

Desta forma, como o transformador ideal não dissipa potências ativa e reativa, determina-se a relação (15).

$$\begin{aligned} \dot{S}_p &= \dot{E}_p \dot{I}_{pq}^* \\ \dot{S}_{pn} + \dot{S}_{np} &= 0 \\ \dot{E}_p \dot{I}_{pq}^{*série} + \dot{E}_n \dot{I}_{qp}^{*série} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Aplicando as relações (13) e (14) na equação (15) obtém-se o equacionamento da componente série da corrente da linha,  $\dot{I}_{pq}^{série}$ , considerando a relação de transformação 1 :  $a$  do transformador, segundo a equação (16).

$$\begin{aligned} \dot{I}_{pq}^{série} &= a \dot{I}_{nq}^{série} \\ \dot{I}_{pq}^{série} &= a \left[ \dot{y}_{pq} (\dot{E}_n - \dot{E}_q) \right] \\ \dot{I}_{pq}^{série} &= a \dot{y}_{pq} (a \dot{E}_p - \dot{E}_q) \end{aligned} \quad (16)$$

A componente *shunt* da corrente da linha  $\dot{I}_{pq}^{sh}$  é calculado conforme a relação (17).

$$\dot{I}_{pq}^{sh} = \dot{E}_p \frac{\dot{y}_{pq}^{sh}}{2} \quad (17)$$

A corrente da linha de transmissão é calculada conforme a equação (18).

$$\begin{aligned} \dot{I}_{pq} &= \dot{I}_{pq}^{série} + \dot{I}_{pq}^{sh} \\ \dot{I}_{pq}^{sh} &= \dot{E}_p \frac{\dot{y}_{pq}^{sh}}{2} \\ \dot{I}_{pq} &= a \dot{y}_{pq} (a \dot{E}_p - \dot{E}_q) + \dot{E}_p \frac{\dot{y}_{pq}^{sh}}{2} \end{aligned} \quad (18)$$

Para se determinar o fluxo de potência aparente entre os barramentos  $p$  e  $q$ , analisa-se o complexo conjugado da relação (15), conforme apresentado em (20). A tensão do

barramento pode ser re-escrita em coordenadas retangulares  $\dot{E}_i = e_i + j f_i$ , sendo  $e_i$  e  $f_i$  as componentes real e imaginária, respectivamente, da tensão no barramento  $i$  e  $j$  o operador de números complexos.

$$\dot{S}_{pq}^* \text{ série} = \dot{E}_p^* \dot{I}_{pq}^{\text{ série}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_p^* \dot{I}_{pq}^{\text{ série}} &= (e_p - j f_p) \left[ a y_{pq} (a(e_p + j f_p) - (e_q + j f_q)) \right] \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= (e_p - j f_p) \left[ a(g_{pq} + j b_{pq}) (a(e_p + j f_p) - (e_q + j f_q)) \right] \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= a \left[ (e_p g_{pq} + f_p b_{pq}) + j(e_p b_{pq} - f_p g_{pq}) \right] \left[ (a e_p - e_q) + j(a e_p - e_q) \right] \\ \alpha &= (e_p g_{pq} + f_p b_{pq}) \\ \beta &= (e_p b_{pq} - f_p g_{pq}) \\ \gamma &= (a e_p - e_q) \\ \delta &= (a e_p - e_q) \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= a \left[ (\alpha + j \beta)(\gamma + j \delta) \right] \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= a \left[ (\alpha \gamma) - (\beta \delta) + j((\alpha \delta) + (\beta \gamma)) \right] \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= \left[ a^2(e_p^2 + f_p^2)g_{pq} - g_{pq}a(e_p e_q + f_p f_q) - b_{pq}a(e_p f_q - e_q f_p) \right] + \\ &\quad + j \left[ a^2 b_{pq}(e_p^2 + f_p^2) - b_{pq}a(e_p e_q + f_p f_q) + g_{pq}a(e_q f_p - e_p f_q) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Acrescentando o componente *shunt* da linha obtém-se o equacionamento do fluxo de potência aparente da linha de transmissão  $pq$  conforme (21). As componentes ativa (real) e reativa (imaginária) da relação (21) são apresentadas em (22) e (23).

$$\begin{aligned} \dot{S}_{pq} &= \dot{S}_{pq}^{\text{ série}} + \dot{S}_{pq}^{\text{ sh}} \\ \dot{S}_p^{\text{ sh}} &= -j \frac{y_{pq}^{\text{ sh}}}{2} (e_p^2 + f_p^2) \\ \dot{S}_{pq}^* \text{ série} &= \left[ a^2(e_p^2 + f_p^2)g_{pq} - g_{pq}a(e_p e_q + f_p f_q) - b_{pq}a(e_p f_q - e_q f_p) \right] + \\ &\quad + j \left[ a^2(b_{pq} + \frac{y_{pq}^{\text{ sh}}}{2})(e_p^2 + f_p^2) - b_{pq}a(e_p e_q + f_p f_q) + g_{pq}a(e_q f_p - e_p f_q) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_{pq} = g_{pq}a^2(e_p^2 + f_p^2) - a(e_p e_q + f_p f_q)g_{pq} - a(e_p f_q - e_q f_p)b_{pq} \quad (22)$$

$$Q_{pq} = -(b_{pq} + \frac{y_{pq}^{\text{ sh}}}{2})a^2(e_p^2 + f_p^2) - a(e_p f_q - e_q f_p)g_{pq} + a(e_p e_q + f_p f_q)b_{pq} \quad (23)$$

As perdas ativas e reativas na linha de transmissão são determinadas pelas equações (24) e (25).

$$P_{pq} + P_{qp} = a^2(e_p^2 + f_p^2)g_{pq} + (e_q^2 + f_q^2)g_{pq} - 2g_{pq}a(e_p e_q + f_p f_q) \quad (24)$$

$$Q_{pq} + Q_{qp} = -(b_{pq} + \frac{y_{pq}^{sh}}{2})[a^2(e_p^2 + f_p^2) + (e_q^2 + f_q^2) - 2a(e_p e_q + f_p f_q)] \quad (25)$$

#### 4.1.1 Injeção de potência na barra $p$

A injeção das correntes nas barras da rede é dada pelo produto da matriz de admitância das barras pelo vetor das tensões de barra, como apresentado em (26) (MONTICELLI, 1983), onde  $NB$  representa o número de barras do sistema.

$$[\dot{I}] = [\dot{Y}] \cdot [\dot{E}] \quad (26)$$

sendo  $\dot{I}$  o vetor das injeções de corrente, cujas componentes são  $I_p$  ( $p = 1, \dots, NB$ ),  $\dot{E}$  é o vetor das tensões de barras, cujas componentes são  $E_p = e_p + jf_p$  e  $\dot{Y} = G + jB$  representa a matriz de admitância de barras. Os elementos fora da diagonal e da diagonal da matriz  $Y$  são obtidos, respectivamente, pelas equações (27) e (28).

$$Y_{pq} = -a_{pq}y_{pq} \quad (27)$$

$$Y_p = jy_p^{sh} + \sum_{m \in \Omega_p} (jy_{pm}^{sh} + a_{pm}^2 y_{pm}) \quad (28)$$

sendo  $\Omega_p$  o conjunto de barras vizinhas à barra  $p$ .

A injeção de corrente (26) pode ser expressa de forma matricial (29), ou na forma compacta (30).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_p \\ \vdots \\ \dot{I}_q \\ \vdots \\ \dot{I}_{NB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \cdots & \dot{Y}_{1p} & \cdots & \dot{Y}_{1q} & \cdots & \dot{Y}_{1NB} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \cdots & \dot{Y}_{2p} & \cdots & \dot{Y}_{2q} & \cdots & \dot{Y}_{2NB} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{p1} & \dot{Y}_{p2} & \cdots & \dot{Y}_{pp} & \cdots & \dot{Y}_{pq} & \cdots & \dot{Y}_{pNB} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{q1} & \dot{Y}_{q2} & \cdots & \dot{Y}_{qp} & \cdots & \dot{Y}_{qq} & \cdots & \dot{Y}_{qNB} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{NB1} & \dot{Y}_{NB2} & \cdots & \dot{Y}_{NBp} & \cdots & \dot{Y}_{NBq} & \cdots & \dot{Y}_{NB NB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_p \\ \vdots \\ \dot{E}_q \\ \vdots \\ \dot{E}_{NB} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$I_p = \sum_{m \in K} (Y_{pm} E_m) \quad p = 1, \dots, NB \quad (30)$$

onde  $K$  representa o conjunto de barras vizinhas à barra  $p$ , incluindo a própria barra  $p$ .



Substituindo a injeção de corrente  $I_p$  na equação (19), obtém-se as equações de injeção de potência na barra  $p$  em coordenadas retangulares, conforme apresentado na equação (31).

$$\begin{aligned} \dot{S}_{pq}^{* \text{ série}} &= \dot{E}_p^* I_{pq}^{\text{ série}} \\ P_p - jQ_p &= \dot{E}_p^* \sum_{m \in K} (Y_{pm} E_m) \\ P_p - jQ_p &= (e_p - jf_p) \sum_{m \in K} (Y_{pm} E_m) \quad p = 1, \dots, NB \end{aligned} \quad (31)$$

As injeções de potências ativa e reativa, são obtidas expandindo a equação (31), e separando as suas componentes real (32) e imaginária (33).

$$P_p = e_p \sum_{m \in K} (G_{pm} e_m + B_{pm} f_{pm}) + f_p \sum_{m \in K} (G_{pm} f_m - B_{pm} e_m) \quad p = 1, \dots, NB \quad (32)$$

$$Q_p = f_p \sum_{m \in K} (G_{pm} e_m + B_{pm} f_{pm}) - e_p \sum_{m \in K} (G_{pm} f_m - B_{pm} e_m) \quad p = 1, \dots, NB \quad (33)$$

## 4.2 FLUXO DE POTÊNCIA EM COORDENADAS RETANGULARES

Para determinar o estado do sistema elétrico operando em regime permanente, deve-se resolver as equações de fluxo de potência. O problema de fluxo de potência consiste na solução do sistema não linear referente ao conjunto de equações de balanço de potências ativa e reativa para cada barra  $p$  do sistema ( $g(x) = 0$ ), dadas pelas equações (34) e (35).

$$P_{ger}^p - P_{carga}^p - \left[ e_p \sum_{m \in K} (G_{pm} e_m + B_{pm} f_{pm}) + f_p \sum_{m \in K} (G_{pm} f_m - B_{pm} e_m) \right] = 0 \quad p = 1, \dots, NB \quad (34)$$

$$Q_{ger}^p - Q_{carga}^p - \left[ f_p \sum_{m \in K} (G_{pm} e_m + B_{pm} f_{pm}) - e_p \sum_{m \in K} (G_{pm} f_m - B_{pm} e_m) \right] = 0 \quad p = 1, \dots, NB \quad (35)$$

Para solucionar o problema do fluxo de potência deve-se determinar o estado da rede através das equações (32) e (33), onde cada barra do sistema é classificada como barra de geração (PV), barra de carga (PQ) e barra de referência ( $V\theta$ ). Para as barras PQs são conhecidos seus valores de  $P_{carga}$  e  $Q_{carga}$ , para as barras PVs são conhecidos seus valores de  $P_{ger}$ ,  $e$  e  $f$  e para a barra de folga seus valores de  $e$  e  $f$ .

A solução do sistema matricial (36) onde os elementos  $\Delta P^p = P_{ger}^p - P_{carga}^p - P_p$  e  $\Delta Q^p = Q_{ger}^p - Q_{carga}^p - Q_p$ , fornece o estado da rede para o cálculo de fluxo de potência.

Neste sistema tem-se  $2NPV + NPQ$  equações algébricas não-lineares, sendo  $NPV$  o número de barras PVs (geração) e  $NPQ$  o número de barras PQs (carga).

A introdução dos novos valores de potências ativas e reativas ao estudo incorre na adição de  $2(NPV + 1)$  equações algébricas não-lineares, onde todas as variáveis envolvidas são expressas de forma explícitas.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ - - - \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial e_1}{\partial Q_n} & \cdots & \frac{\partial e_{n-1}}{\partial Q_n} & \frac{\partial f_1}{\partial Q_n} & \cdots & \frac{\partial f_{n-1}}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial e_1}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial e_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial f_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial f_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ - - - \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \quad (36)$$

#### 4.3 MODELO DE PCSO MULTIOBJETIVO DETERMINÍSTICO

O problema de FPO considerando o despacho ótimo de geração e controle de potência reativa neste trabalho é modelado em sistema de coordenadas retangulares através de um modelo de PCSO determinístico multi-objetivo.

Sejam as equações do fluxo de potência convencional em coordenadas retangulares (32)-(33). Estas equações podem ser re-escritas usando as variáveis auxiliares  $d_i$ ,  $e_{ij}$  e  $f_{ij}$ , onde  $d_i$  representa o módulo da tensão  $d_i^2 = e_i^2 + f_i^2$  do barramento  $i$ , e  $e_{ij}$  e  $f_{ij}$  descrevem o produto dos módulos das tensões entre os barramentos  $i$  e  $j$  (TAYLOR; HOVER, 2013; JABR, 2013).

$$p_i^{inj} = G_{ii}d_i + \sum_{\substack{j \in \mathbf{B} \\ j \neq i}} (G_{ij}e_{ij} + B_{ij}f_{ij}); \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (37a)$$

$$q_i^{inj} = -B_{ii}d_i + \sum_{\substack{j \in \mathbf{B} \\ j \neq i}} (G_{ij}f_{ij} - B_{ij}e_{ij}); \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (37b)$$

$$d_i d_j \geq e_{ij}^2 + f_{ij}^2; \quad ij \in \mathbf{R}; \quad (37c)$$

$$e_{ij} \geq 0; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (37d)$$

$$d_i \geq 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (37e)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \delta_i \leq \frac{\pi}{2}; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (37f)$$

$$-\varepsilon \leq \delta_i - \delta_j - f_{ij} \leq \varepsilon; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (37g)$$

$$a_{ij_{min}}^2 d_i \leq d_j \leq a_{ij_{max}}^2 d_i; \quad \forall ij \in \mathbf{T}; \quad (37h)$$

onde  $e_{ij}$  e  $f_{ij}$  são variáveis auxiliares associadas ao produto dos módulos de tensão dos barramentos  $i$  e  $j$  no sistema de coordenadas retangulares.

A equação (37c) representa a relaxação cônica equivalente das injeção de potência ativa e reativa (37a) - (37b) entre os ramos  $ij$ , sendo  $d$  a variável auxiliar associada ao quadrado da magnitude de tensão  $d_i = e_{ii}^2 + f_{ii}^2$  no modelo cônico da tensão. As restrições (37d) - (37e) impõem a não negatividade das variáveis auxiliares  $d_i$  e  $e_{ij}$ . As restrições (37f) - (37g) são os limites angulares de tensão para a barra  $i$  e a relaxação cônica entre as tensões do ramo  $ij$ , respectivamente, onde o parâmetro  $\varepsilon$  é a tolerância angular adotada e seu valor deve respeitar o intervalo de  $[0, 25, 0, 50][\text{grau}]$  (JABR, 2013).

Os parâmetros  $T_{ij}^{min}$  e  $T_{ij}^{max}$  dados pela equação (4i) não foram adotados no modelo, neste trabalho utiliza-se uma faixa de ganho de tensão dos transformadores ( $a_{ij}$ ) (37h).

O problema do DOGCPR determinístico utilizando PCSO é formulado através do conjunto de equações (38).

$$\min : FO_1^{det} w_1 + FO_2^{det} w_2 + FO_3^{det} w_3 \quad (38a)$$

s.a

$$p_i - P_{D_i} - p_i^{inj} = 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (38b)$$

$$q_i - Q_{D_i} + q_{SH_i} - q_i^{inj} = 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (38c)$$

$$P_{gt}^{min} \leq p_{gt} \leq P_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (38d)$$

$$Q_{gt}^{min} \leq q_{gt} \leq Q_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (38e)$$

$$Q_{SH_i}^{min} \leq q_{SH_i} \leq Q_{SH_i}^{max}; \quad \forall i \in \mathbf{E}; \quad (38f)$$

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (38g)$$

$$(V_i^{min})^2 \leq d_i \leq (V_i^{max})^2; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (38h)$$

$$d_i d_j \geq e_{ij}^2 + f_{ij}^2; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (38i)$$

$$-\varepsilon \leq \delta_i - \delta_j - f_{ij} \leq \varepsilon; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (38j)$$

$$a_{ij_{min}}^2 d_i \leq d_j \leq a_{ij_{max}}^2 d_i; \quad \forall ij \in \mathbf{T}; \quad (38k)$$

$$d_i \geq 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (38l)$$

$$e_{ij} \geq 0; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (38m)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1; \quad (38n)$$

onde o parâmetro  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3 \geq 0$ , em (38a), sintonizam a ponderação dos pesos das componentes das funções do modelo respeitando a restrição (38n).

As FOs analisadas neste estudo são apresentadas na Tabela (2).

Tabela 2 – Funções objetivo utilizadas no modelo determinístico

	<b>Função Objetivo</b>	<b>Formulação</b>
$F0_1^{det}$	Custo de geração de potência horária ( $\$_{Ger}$ ) [ $US\$/hora$ ]	$\sum_{gt \in \mathbf{Gt}} (p_{gt}^2 c_{gt2} + p_{gt} c_{gt1} + c_{gt0})$
$F0_2^{det}$	Custo de perdas de potência ativa horária ( $\$_{Pa}$ ) [ $US\$/hora$ ]	$\sum_{i \in \mathbf{B}} (p_i^{inj} c_{Pa})$
$F0_3^{det}$	Emissão de poluentes horária ( $Em$ ) [ $ton/hora$ ]	$\sum_{gt \in \mathbf{Gt}} [10^{-2}(\alpha_{gt} + \beta_{gt} p_{gt} + \gamma_{gt} p_{gt}^2) + \zeta_{gt} e^{\lambda_{gt} p_{gt}}]$

Fonte: Próprio Autor

sendo  $c_{Pa}$  o coeficiente de custo da perda ativa considerando o custo do  $MWh$ , os parâmetros  $\alpha_{gt}$ ,  $\beta_{gt}$ ,  $\gamma_{gt}$ ,  $\zeta_{gt}$  e  $\lambda_{gt}$  são os coeficientes de emissão das gerações termoeletricas (ABIDO, 2003) e os parâmetros  $c_{gt2}$ ,  $c_{gt1}$  e  $c_{gt0}$  representam os coeficientes de custos quadrático, linear e constante, respectivamente, das gerações termoeletricas de cada barramento de geração  $gt$ .

#### 4.4 MODELO DE PCSO MULTI-OBJETIVO PARA O PROBLEMA DOGCPR ESTOCÁSTICO

Nesta seção apresenta-se a formulação do problema de FPO do despacho ótimo de geração e controle de potência reativa através de um modelo de PCSO estocástico multiobjetivo, considerando a estocasticidade da demanda das cargas e das fontes de geração renováveis de energia, relacionadas com a velocidade do vento, nível de radiação solar e temperatura ambiente.

Antes de desenvolver a formulação do problema do DOGCPR estocástico, definem-se as estratégias de geração de cenários utilizada neste trabalho na seção (4.4.1). Na Seção (4.4.2) apresentam-se os modelos utilizados para as fontes de geração renováveis.

##### 4.4.1 Geração dos cenários

As incertezas no modelo do problema de FPO, em geral, podem ser de diferente natureza, afetando de formas distintas a estrutura física do sistema e/ou o mercado de energia. Tradicionalmente considera-se a presença de tais incertezas na disponibilidade de determinados equipamentos elétricos do SEP (geradores e transformadores), estimação do nível demanda, preços de determinadas fontes geradoras (combustível fóssil, nível do reservatório, velocidade do vento, radiação solar, entre outros), topologia do sistema (contingências).

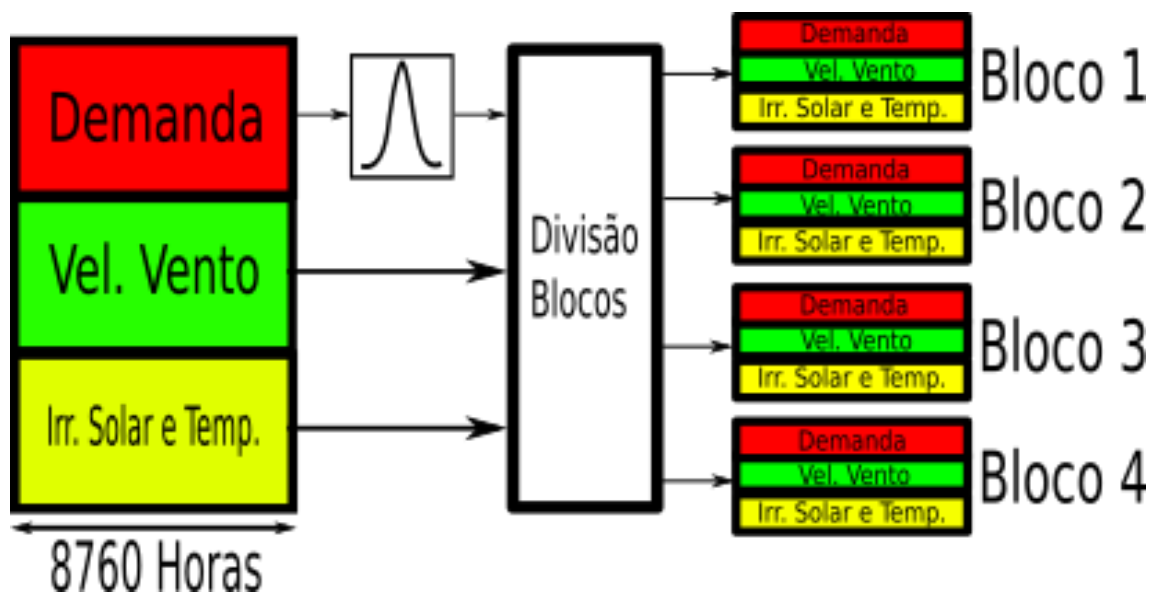
Neste trabalho consideram-se incertezas nos níveis de demandas das cargas e nos fatores climáticos usados pelas fontes de geração não renováveis. Os cenários de demanda de carga são gerados a partir dos níveis de demanda horário médio fornecido pelo Operador

Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2019), que são apresentados no Anexo (B), através de uma função de distribuição normal com 5% de desvio padrão.

Os níveis de velocidade do vento, radiação solar e temperatura ambiente foram adotados os mesmos do site Pfenninger e Staffell (2016), para a região nordeste brasileira, visto que esta região tem apresentado um elevado destaque na implantação e geração de energia de fontes renováveis, principalmente eólica. Desta forma, consideram-se as incertezas do nível de demanda de carga, velocidade do vento, nível de radiação solar e temperatura ambiente no período de um ano (8760 horas), para obter os cenários representativos do comportamento dessas variáveis de incertezas conforme a seguinte estratégia (MUÑOZ-DELGADO; CONTRERAS; ARROYO, 2016; BARINGO; CONEJO, 2013):

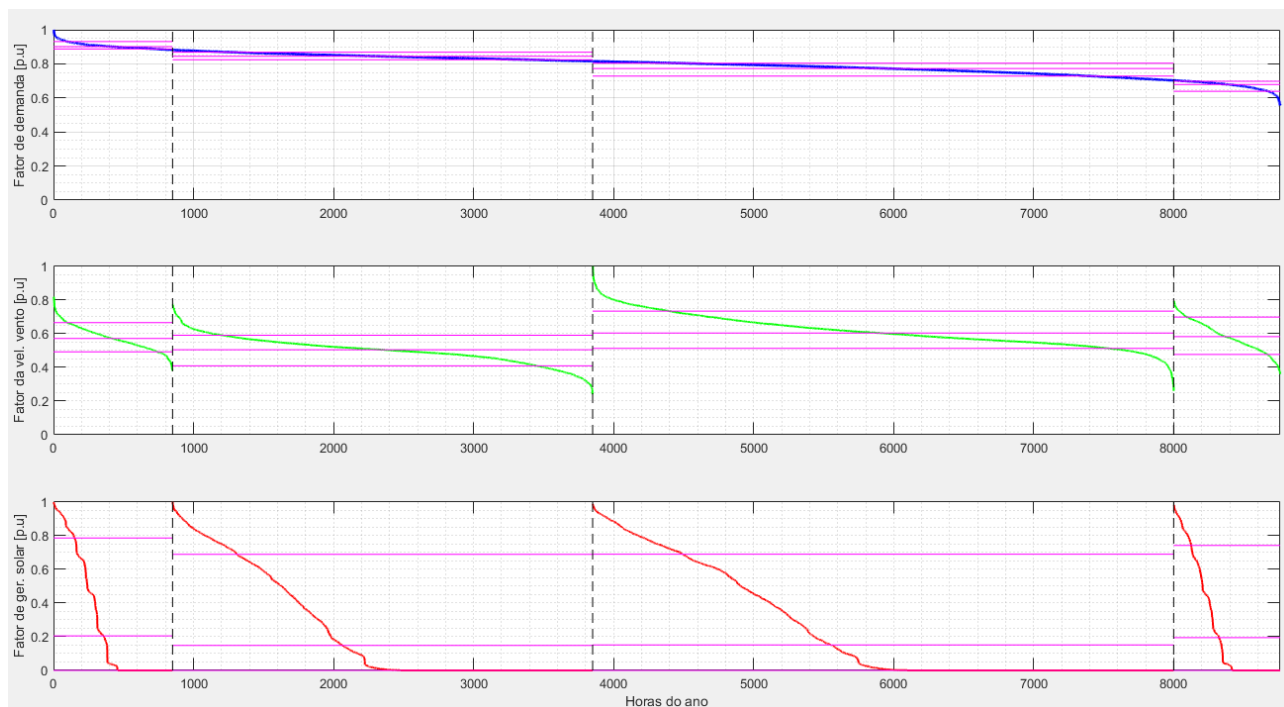
1. Obtenção dos dados históricos da variável de incerteza no período de um ano, dividido em quatro blocos de tempo, como ilustrado na Figura (8);
2. Definem-se alguns níveis para a variável de incerteza em cada bloco de tempo, conforme a Figura (9);
3. Após a definição dos níveis das variáveis de incerteza, determinam-se os valores médios dos níveis das variáveis de incerteza utilizando suas funções de probabilidade acumulada, conforme ilustrado na Figura (10);
4. Geram-se os cenários ( $\Omega$ ) aplicando a combinação das probabilidades ( $\rho$ ) de cada uma das variáveis de incerteza presentes no mesmo bloco e tempo, como é apresentado na Figura (11).

Figura 8 – Geração dos cenários: primeiro passo



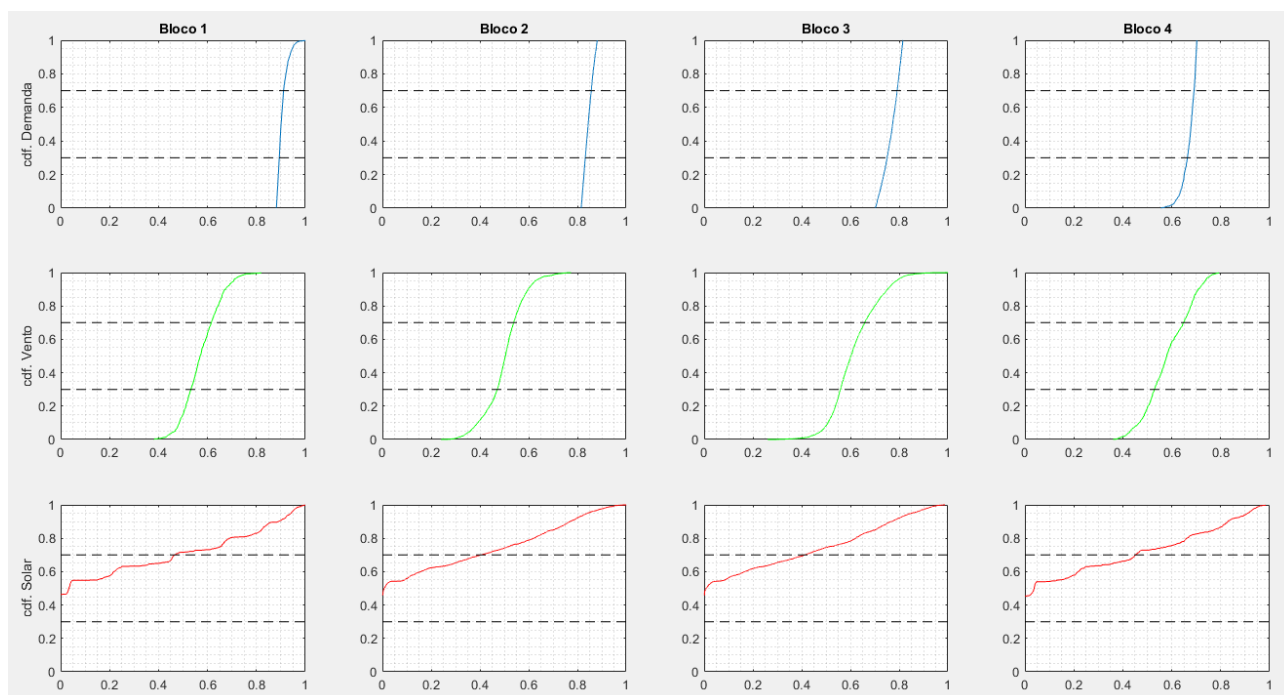
Fonte: Próprio Autor

Figura 9 – Geração dos cenários: segundo passo



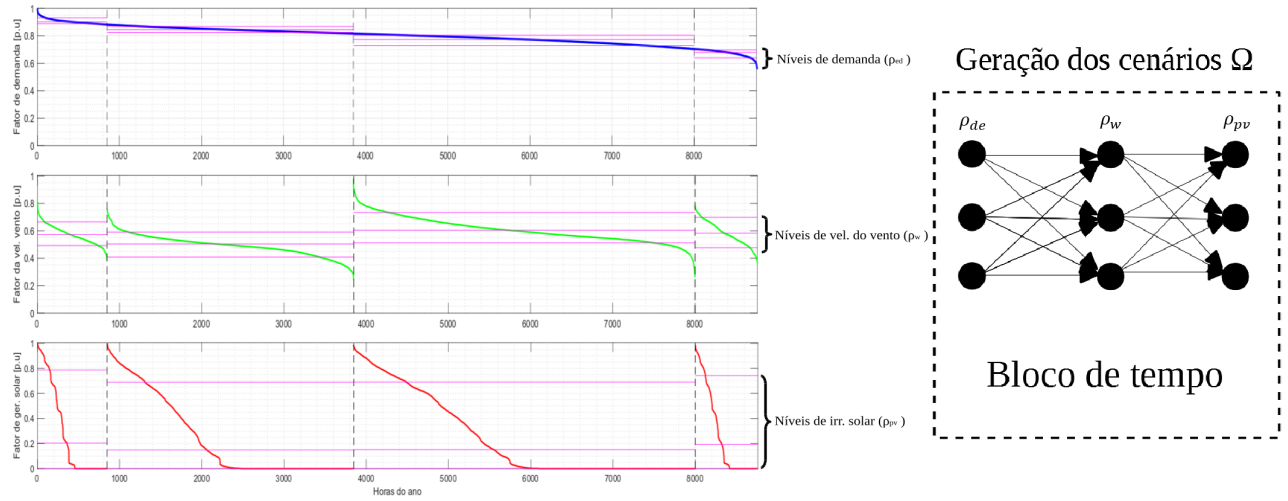
Fonte: Próprio Autor

Figura 10 – Geração dos cenários: terceiro passo



Fonte: Próprio Autor

Figura 11 – Geração dos cenários: quarto passo



Fonte: Próprio Autor

#### 4.4.2 Fontes de geração renováveis e não renováveis

As fontes de geração não renováveis são aquelas que utilizam recursos naturais esgotáveis, como o carvão mineral, petróleo, entre outros, enquanto que as fontes de geração renováveis são aquelas que podem ser consideradas inesgotáveis, como a irradiação solar, força do vento, material orgânico, quedas de água, energia do mar, geotérmica, entre outras (YADAV; SRIVASTAVA, 2014).

Os sistemas elétricos que possuem mais de um tipo de fonte de geração de energia (sistema híbrido), geralmente, apresentam menores custos operacionais e melhor confiabilidade em relação aos SEPs com apenas um tipo de fonte de energia (LUNA-RUBIO et al., 2012).

Com a intensificação dos impactos ambientais gerados pelo consumo dos combustíveis fósseis, observou-se um crescente investimento no desenvolvimento de fontes de geração de energia alternativa para satisfazer a demanda energética mundial. A instalação de gerações renováveis resulta em grandes benefícios sociais, como: redução das emissões de dióxido de carbono; maior acesso à energia elétrica especialmente em regiões afastadas dos centros de geração; entre outros. Contudo, a modelagem matemática destas fontes de energia renováveis implica na introdução de variáveis estocásticas no modelo do problema do FPO, devido às incertezas e intermitências destas fontes primárias. Desta forma, os problemas de planejamento da operação e planejamento do sistema devem ser formulados utilizando análises probabilísticas (ZHOU et al., 2010).

#### 4.4.3 Fonte de geração não renovável: Termoelétrica

A geração não renovável considerada neste trabalho são as termoelétricas, e sua formulação é apresentada pelo conjunto de equações (39).

$$P_{gt}^{min} \leq p_{gt} \leq P_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (39a)$$

$$Q_{gt}^{min} \leq q_{gt} \leq Q_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (39b)$$

$$p_{gt} \geq 0; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (39c)$$

$$p_{gt}^2 + q_{gt}^2 \leq S_{gt}^{max}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (39d)$$

onde o índice  $gt \in \mathbf{Gt}$  representa o conjunto de barramentos que possuem gerações termoelétricas instaladas.

#### 4.4.4 Fonte de geração renovável: Hidroelétrica

As usinas hidroelétricas são conjunto de obra e equipamentos que produzem energia elétrica utilizando o potencial hidráulico existente da pressão da água de rios para girar as turbinas, transformando a energia potencial em energia cinética que posteriormente é convertida em energia elétrica.

A formulação (40) modela a geração hidroelétrica utilizada no modelo de FPO.

$$P_{gh}^{min} \leq p_{gh} \leq P_{gh}^{max}; \quad \forall gh \in \mathbf{Gh}; \quad (40a)$$

$$Q_{gh}^{min} \leq q_{gh} \leq Q_{gh}^{max}; \quad \forall gh \in \mathbf{Gh}; \quad (40b)$$

$$p_{gh} \geq 0; \quad \forall gh \in \mathbf{Gh}; \quad (40c)$$

$$p_{gh}^2 + q_{gh}^2 \leq S_{gh}^{max}; \quad \forall gh \in \mathbf{Gh}; \quad (40d)$$

onde o índice  $gh \in \mathbf{Gh}$  representa o conjunto de barramentos que apresentam gerações hidroelétricas instaladas.

As restrições (39a)-(39b) e as restrições (40a)-(40b) representam os limites de geração de potência ativa e reativa, respectivamente das unidades de geração termoelétrica e hidroelétrica, respectivamente. As restrições (39c) e (40c) representam matematicamente o comportamento não nulo da geração de potência ativa para as gerações termoelétricas e hidroelétricas, respectivamente. As restrições (39d) e (40d) representam os limites das capacidades de geração de potência aparente dos geradores termoelétricos e hidroelétricos, respectivamente, ou seja uma representação aproximada de duas curvas de capacidade térmica. Neste estudo não se utilizou o modelo exato das curvas de capacidade dos geradores.



#### 4.4.5 Fonte de geração renovável: eólica

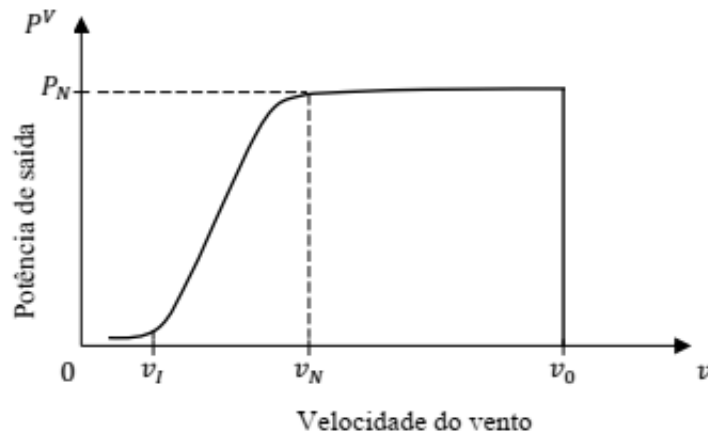
A geração eólica é definida como sendo a transformação da energia cinética do vento em energia elétrica utilizando as turbinas eólicas dos geradores, destacando-se como uma das mais promissoras e importantes fontes de energia renovável no mundo.

Ellabban, Abu-Rub e Blaabjerg (2014) destaca que as turbinas eólicas podem produzir potência ativa e reativa, assim como a capacidade de recuperação do fornecimento de energia após a incidência de faltas no sistema e são constituídas por três componentes fundamentais: a torre onde é instalada a turbina, rotor com pás giratórias e um sistema de controle.

As tecnologias modernas para o controle de potência fornecida pelo gerador eólico são de dois tipos: *i*) Controlador eletrônico que compara a potência de saída da turbina com uma taxa de amostragem e, a partir dessa amostragem, reduz a velocidade do rotor caso a potência de saída esteja muito elevada; *ii*) Controle projetado segundo as características geométricas e aerodinâmicas das pás do rotor, como o controle de parada em caso de velocidade de vento muito alta que pode comprometer a estrutura e operação da turbina.

A operação dos geradores eólicos no sistema elétrico exige uma modelagem que considere as incertezas no comportamento da velocidade do vento, dependendo a região geográfica que o gerador está instalado, porque a velocidade do vento pode não ser suficiente para girar o rotor a uma velocidade adequada para a geração de energia elétrica. Desta forma, o rotor está acoplado a uma caixa de marchas para elevar a velocidade de giro do rotor. Na Figura (12) apresenta-se o comportamento da geração de energia elétrica de uma turbina eólica em função da velocidade do vento nas pás da turbina.

Figura 12 – Curva de potência de saída das turbinas eólicas



Fonte: (ORTIZ, 2019)

A curva de potência de saída apresentada na Figura (12) pode ser aproximada por uma função linear por partes conforme o conjunto de equações (41) (MONTROYA-BUENO; MUOZ; CONTRERAS, 2015).

$$p_{ge} = \begin{cases} 0, & v < v_I \\ \frac{P_{geN}}{(v_N - v_I)}v + P_{geN} \left[ 1 - \frac{v_N}{(v_N - v_I)} \right], & v_I \leq v < v_N \\ P_{geN}, & v_N \leq v < v_0 \\ 0, & v \geq v_0 \end{cases} \quad (41)$$

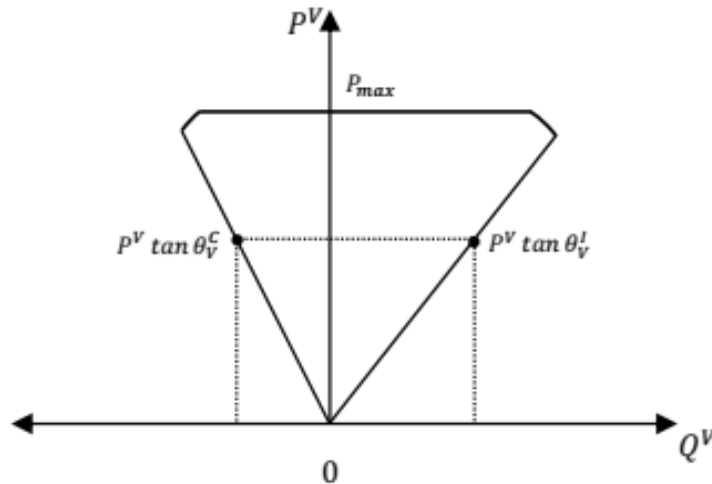
sendo a variável  $p_{ge}$  representa a potência ativa produzida na saída da turbina eólica em função da velocidade do vento  $v$ ,  $P_{geN}$  representa a potência nominal da turbina eólica,  $v_I$ ,  $v_N$  e  $v_0$  representam as velocidades mínima (*cut-in*), nominal e máxima (*cut-out*) da turbina eólica, respectivamente. Caso  $v$  esteja superior à  $v_0$  o controlador é acionado, interrompendo a geração de energia elétrica e protegendo o equipamento de possíveis danos.

Os geradores eólicos são uma máquina de indução duplamente alimentada (DFIG), sendo assim, sua curva de capacidade pode ser descrita segundo o conjunto de equações (42) e ilustrada conforme a Figura (13).

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_{ge} \leq P_{ge}^{max} \\ -p_{ge} \operatorname{tg}(\delta_{ge}^C) &\leq q_{ge} \leq p_{ge} \operatorname{tg}(\delta_{ge}^I) \\ p_{ge}^2 + q_{ge}^2 &\leq (S_{ge}^{max})^2 \end{aligned} \quad (42)$$

onde o parâmetro  $P_{ge}^{max}$  representa a máxima geração de potência ativa da turbina, e  $S_{ge}^{max}$  representa a máxima capacidade de geração de potência aparente da turbina. Nesta pesquisa adotou-se que a geração eólica produz potência reativa considerando os fatores de injeção de potência indutivo  $\operatorname{tg}(\delta_{ge}^I)$  e capacitivo  $\operatorname{tg}(\delta_{ge}^C)$ .

Figura 13 – Curva de capacidade da turbina eólica (DFIG)



Fonte: (ORTIZ, 2019)

#### 4.4.6 Fonte de geração renovável: fotovoltaica

A irradiação solar pode ser aproveitada tanto de forma direta (fonte de luz e aquecimento), quanto de forma indireta por meio de dispositivos, para geração de energia elétrica. Além de inesgotável, a luz solar é considerada uma fonte de energia limpa, reforçando ainda mais sua utilização como fonte de geração alternativa em relação às fontes de geração de energia não renováveis.

Na geração fotovoltaica utilizam-se células fotovoltaicas que, através do efeito fotoelétrico, gera corrente contínua, a qual na maioria das aplicações deve ser transformada em corrente alternada para o seu aproveitamento. Geralmente, as células fotovoltaicas são organizadas em arranjos para formar um painel fotovoltaico e aumentar a área de aproveitamento da irradiação solar. Devido a isso, a geração fotovoltaica destaca-se como sendo a geração de maior crescimento em comparação as demais fontes renováveis (SAWIN et al., 2018), além de apresentar fácil instalação, baixo risco e rápido retorno de investimentos para todos os tipos de usuários.

A geração fotovoltaica, da mesma forma que as turbinas eólicas, necessita de uma modelagem que considere as incertezas no comportamento meteorológico e a disponibilidade da irradiação solar ao longo de todo o dia. A potência injetada pelos painéis fotovoltaicos modelados neste trabalho é calculada segundo as equações lineares (43) e (44) (MONTROYA-BUENO; MUOZ; CONTRERAS, 2015).

$$p_{gpv} = P_{gpvN} \left[ \frac{rad_{sol}}{1000} (1 - \partial(T(rad_{pv})_{cel} - 25)) \right] \quad (43)$$

$$T(rad_{pv})_{cel} = T_{amb} + rad_{pv} \left[ \frac{(NOCT - 20)}{800} \right] \quad (44)$$

onde a variável  $p_{gpv}$  representa a potência ativa de saída do painel fotovoltaico em função da irradiação solar,  $rad_{pv}$ . O parâmetro  $P_{gpvN}$  representa a potência de saída nominal do painel,  $\partial$  o coeficiente de temperatura,  $T(rad_{pv})_{cel}$  a temperatura da célula,  $T_{amb}$  a temperatura ambiente, e  $NOCT$  a temperatura de operação nominal da célula.

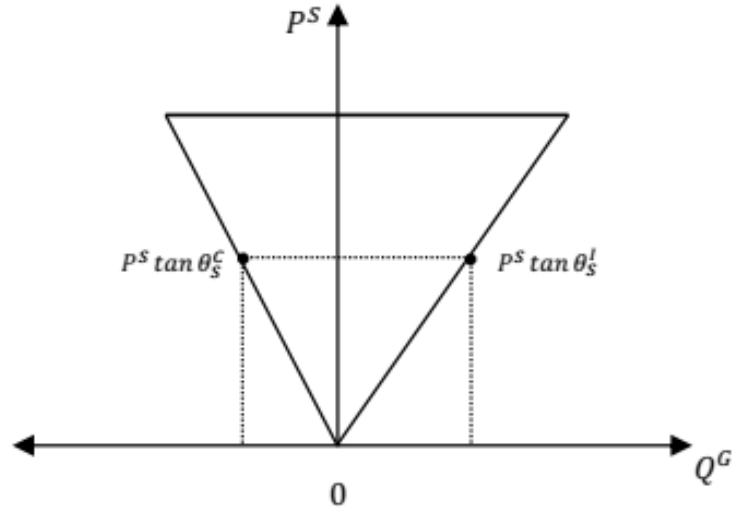
A curva de potência injetada pelo sistema fotovoltaico é apresentada na Figura (14). A modelagem matemática considerando o limite operacional de potência fornecida é representada pelo conjunto de equações (45).

$$\begin{aligned} -p_{gpv} \operatorname{tg}(\delta_{gpv}^C) &\leq q_{gpv} \leq p_{gpv} \operatorname{tg}(\delta_{gpv}^I) \\ 0 &\leq p_{gpv} \leq P_{gpv}^{max} \end{aligned} \quad (45)$$

onde a variável  $q_{gpv}$  é a potência reativa gerada em função da potência ativa. As componentes  $\operatorname{tg}(\delta_{gpv}^I)$  e  $\operatorname{tg}(\delta_{gpv}^C)$  são os fatores de injeção de potência indutivo e capacitivo, respectivamente.

Para facilitar a modelagem, neste trabalho não é considerada a injeção de potência reativa sem que seja injetada potência ativa.

Figura 14 – Curva de capacidade do painel fotovoltaico



Fonte: (ORTIZ, 2019)

#### 4.4.7 Formulação do problema do DOGCPR estocástico

Considerando a formulação do problema do DOGCPR determinístico (38) e os modelos estocásticos da demanda e fontes de geração renováveis o problema de DOGCPR estocástico multiobjetivo utilizando PCSO, é formulado de acordo com o conjunto de equações (46).

$$\begin{aligned}
 \min : & \sum_{de,w,pv \in \Omega_{de,w,pv}} \rho_{de,w,pv} (FO_1^{est} w_1 + FO_2^{est} w_2 + FO_3^{est} w_3) \\
 \text{s.a} & \\
 p_{total,i,de,w,pv} - P_{D_{i,de,w,pv}} - p_{i,de,w,pv}^{inj} &= 0; & \forall i \in \mathbf{B}, \forall de, w, pv \in \Omega_{de,w,pv}; & (46a) \\
 q_{total,i,de,w,pv} - Q_{D_{i,de,w,pv}} + q_{SH_i} - q_{i,de,w,pv}^{inj} &= 0; & \forall i \in \mathbf{B}, \forall de, w, pv \in \Omega_{de,w,pv}; & (46b) \\
 P_{gt}^{min} \leq p_{gt} \leq P_{gt}^{max}; & & \forall gt \in \mathbf{Gt}; & (46c) \\
 P_{gh}^{min} \leq p_{gh} \leq P_{gh}^{max}; & & \forall gh \in \mathbf{Gh}; & (46d) \\
 P_{ge}^{min} \leq p_{ge} \leq P_{ge}^{max}; & & \forall ge \in \mathbf{Ge}; & (46e) \\
 P_{gpv}^{min} \leq p_{gpv} \leq P_{gpv}^{max}; & & \forall gpv \in \mathbf{Gpv}; & (46f) \\
 Q_{gt}^{min} \leq q_{gt} \leq Q_{gt}^{max}; & & \forall gt \in \mathbf{Gt}; & (46g) \\
 Q_{gh}^{min} \leq q_{gh} \leq Q_{gh}^{max}; & & \forall gh \in \mathbf{Gh}; & (46h) \\
 -p_{ge} \operatorname{tg}(\delta_{ge}^C) \leq q_{ge} \leq p_{ge} \operatorname{tg}(\delta_{ge}^I) & & \forall ge \in \mathbf{Ge}; & (46i) \\
 -p_{gpv} \operatorname{tg}(\delta_{gpv}^C) \leq q_{gpv} \leq p_{gpv} \operatorname{tg}(\delta_{gpv}^I) & & \forall gpv \in \mathbf{Gpv}; & (46j) \\
 Q_{SH_i}^{min} \leq q_{SH_i} \leq Q_{SH_i}^{max}; & & \forall i \in \mathbf{E}; & (46k) \\
 p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2; & & \forall ij \in \mathbf{R}; & (46l)
 \end{aligned}$$

$$p_{gt}^2 + q_{gt}^2 \leq S_{gt}^{max2}; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}; \quad (46m)$$

$$p_{gh}^2 + q_{gh}^2 \leq S_{gh}^{max2}; \quad \forall gh \in \mathbf{Gh}; \quad (46n)$$

$$p_{ge}^2 + q_{ge}^2 \leq S_{ge}^{max2}; \quad \forall ge \in \mathbf{Ge}; \quad (46o)$$

$$(V_i^{min})^2 \leq d_i \leq (V_i^{max})^2; \quad \forall i \in \mathbf{B}; \quad (46p)$$

$$d_i d_j \geq e_{ij}^2 + f_{ij}^2; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (46q)$$

$$-\varepsilon \leq \delta_i - \delta_j - f_{ij} \leq \varepsilon; \quad \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (46r)$$

$$a_{ij_{min}}^2 d_i \leq d_j \leq a_{ij_{max}}^2 d_i; \quad \forall ij \in \mathbf{T}; \quad (46s)$$

$$d_i, e_{ij} \geq 0; \quad \forall i \in \mathbf{B}, \forall ij \in \mathbf{R}; \quad (46t)$$

$$p_{gt}, p_{gh}, p_{ge}, p_{gpv} \geq 0; \quad \forall gt \in \mathbf{Gt}, \forall gh \in \mathbf{Gh}, \forall ge \in \mathbf{Ge}, \forall gpv \in \mathbf{Gpv}; \quad (46u)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1; \quad (46v)$$

onde o parâmetro  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3 \geq 0$  da função objetivo do conjunto (46) sintonizam a ponderação dos pesos de cada função objetivo e suas relações devem respeitar a restrição (46v). O parâmetro  $\rho_{de,w,pv}$  representa a combinação das probabilidades dos níveis de demanda, velocidade do vento e irradiação solar de cada cenário analisado. Os termos  $p_{total_{de,w,pv}}$  e  $q_{total_{de,w,pv}}$  são o somatório das potências ativas e reativas, respectivamente, produzidas pelas gerações termoeletrica ( $gt \in \mathbf{Gt}$ ), hidroeletrica ( $gh \in \mathbf{Gh}$ ), eólica ( $ge \in \mathbf{Ge}$ ) e fotovoltaica ( $gpv \in \mathbf{Gpv}$ ).

Os modelos das FOs consideradas neste trabalho são apresentadas na Tabela (3).

Tabela 3 – Funções objetivo utilizadas no modelo estocástico

	Função Objetivo	Formulação
$F0_1^{est}$	Custo de geração de potência (\$Ger) [US\$]	$\sum_{gt \in \mathbf{Gt}} (p_{gt}^2 c_{gt2} + p_{gt} c_{gt1} + c_{gt0}) + \sum_{gh \in \mathbf{Gh}} (p_{gh} c_{gh1} + c_{gh0}) + \sum_{ge \in \mathbf{Ge}} (p_{ge} c_{ge1} + c_{ge0}) + \sum_{gpv \in \mathbf{Gpv}} (p_{gpv} c_{gpv1} + c_{gpv0})$
$F0_2^{est}$	Custo de perdas de potência ativa (\$Pa) [US\$]	$\sum_{i \in \mathbf{B}} (p_i^{inj} c_{Pa})$
$F0_3^{est}$	Emissão de poluentes (Em) [ton]	$\sum_{gt \in \mathbf{Gt}} [10^{-2} (\alpha_{gt} + \beta_{gt} p_{gt} + \gamma_{gt} p_{gt}^2) + \zeta_{gt} e^{\lambda_{gt} p_{gt}}]$

Fonte: Próprio Autor

onde os parâmetros  $c_{gh1}$ ,  $c_{ge1}$ ,  $c_{gpv1}$  e  $c_{gh0}$ ,  $c_{ge0}$ ,  $c_{gpv0}$  representam os custos de geração lineares e constantes das gerações hidroeletrica, eólica e fotovoltaica, respectivamente.

As restrições (46a) - (46b) são o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente, de cada barra  $i$  para todos os cenários de demanda ( $de$ ), velocidade do vento ( $w$ ) e irradiação solar ( $pv$ )  $\forall de, w, pv \in \Omega_{de,w,pv}$  (equações do fluxo de potência).

As restrições (46c) - (46f) e (46g) - (46j) são os limites de fornecimento de potência ativa e reativa, respectivamente, das gerações do sistema.

A restrição (46k) representam os limites de potência reativa fornecido pelo elemento *shunt* do barramento  $i$ . A restrição (46l) representa a capacidade térmica de transferência de potência da linha  $ij$ . As restrições (46m) - (46o) representam as capacidades de geração de energia de cada tipo de geração do sistema.

A restrição (46p) representa o limite de tensão de cada barramento  $i$  do sistema. As restrições (46q)-(46r) representam as relaxações cônicas de tensão e angular, respectivamente. A restrição (46s) representa a faixa de ganho de tensão dos transformadores.

A restrição (46u) representa a não negatividade da geração de potência ativa dos tipos de gerações do sistema.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a implementação computacional dos modelos matemáticos apresentados no capítulo 4. As simulações são realizadas em um computador (servidor) DELL | PowerEdge T430 Intel® Xeon® E5-2650 v4 2,2 GHz, 30M cache, 9,60 GT/s QPI, Turbo, HT, 12 Cores/24 Threads, 64 GBs de memória RAM à 2400 MHz.

Nas simulações do modelo determinístico consideram-se o controle da relação de transformação de tensão dos transformadores e apenas os geradores termoeletrônicos na solução dos sistemas teste *por hora* de operação, com as mesmas condições de simulação do *software* MATPOWER®, permitindo que seus resultados sejam utilizados como *benchmark* para o modelo determinístico proposto.

O modelo determinístico é simulado adotando as seguintes condições de testes:

- **Caso D1:** Modelo determinístico minimizando apenas o custo de geração de energia horária para comparação com o *software* MATPOWER®;
- **Caso D2:** Modelo determinístico minimizando o custo de geração de energia, perdas ativas e emissão de poluentes adotando  $a_{ij} \in [0, 9 - 1, 1]$  como variável de controle.

Nos casos D1 e D2 utilizam-se os custos de geração das gerações termoeletrônicas (ABIDO, 2003; ARAUJO, 2018) apresentados no Anexo (A).

Nas simulações do modelo estocástico adota-se o controle de tensão dos transformadores e são consideradas as gerações renováveis e não renováveis no sistema, sendo em um teste consideradas apenas as gerações térmicas e nos demais as gerações térmicas, hidroelétricas, eólicas e fotovoltaicas.

Os níveis de demanda de carga, velocidade do vento e irradiação solar adotadas nos testes foram obtidas conforme descrito na seção (4.4.1). Nesta análise geram-se quatro blocos de tempo com três níveis de demanda, velocidade do vento e irradiação solar (baixo, médio e alto), respectivamente, para cada bloco de tempo. Todos os valores gerados nesta análise estocástica são apresentados no Anexo (A).

O modelo estocástico é simulado adotando-se as seguintes condições:

- Modelo estocástico minimizando o custo de geração de energia, perdas ativas e emissão de poluentes para os casos:
  - **Caso E1:** Fontes de geração de energia não renováveis;

- **Caso E2:** Gerações termoeletricas e hidroeletricas;
- **Caso E3:** Gerações termoeletricas, hidroeletricas, turbinas eolicas e sistemas fotovoltaicos.

Os modelos determinístico e estocástico de PCSO multiobjetivo são programados em linguagem AMPL e são simulados para os sistemas testes IEEE30, IEEE118 e ACTIVSg200 (BIRCHFIELD et al., 2016). Utiliza-se o *solver* comercial CPLEX 12.9.0 (ILOG, 2017). O custo total analisado é determinado pela soma dos custos de geração e perdas ativas, onde é adotado como US\$ 120,00 o *MWh* para calcular o custo das perdas ativas (ARAUJO, 2018).

Os custos de geração de energia elétrica utilizadas nas simulações são encontrados nos trabalhos de Araujo (2018), Lazards (2018), CCEE (2018), apresentados nas Tabelas (33), (39) e (45) no Anexo (A).

### 5.1 MODELO DETERMINÍSTICO - SISTEMA IEEE30

Na Tabela (4) apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações do caso D1 e pelo *software* MATPOWER<sup>®</sup>, considerando os mesmos custos de geração fornecidos pelo banco de dados do MATPOWER<sup>®</sup>, a faixa de  $[0,95, 1,05]$  *[p.u]* para a magnitude das tensões e tolerância angular de  $0,25$  *[grau]*.

Na Tabela (5) apresentam-se os resultados obtidos pelo modelo determinístico multiobjetivo para o caso D2 considerando os custos de geração da Tabela (33) e adotando a faixa de  $[0,96, 1,04]$  *[p.u]* para a magnitude das tensões.

Nas Figuras (15), (16) e (17) ilustram-se graficamente os resultados da Tabela (5) fixando um dos pesos da função objetivo e variando os demais pesos de forma tal que a relação  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$  seja atendida. Com esta análise apresenta-se no espaço bidimensional o comportamento das componentes das funções objetivo.

Tabela 4 – Sistema IEEE30 - Caso D1 e MATPOWER<sup>®</sup>

	MATPOWER <sup>®</sup>	D1
$\$_{Ger}$ [ <i>US\$/hora</i> ]	8915,50	8912,29
$P_a$ [ <i>MWh</i> ]	11,90	11,61
$P_r$ [ <i>MVarh</i> ]	14,02	14,40
<b>Tempo</b> [ <i>seg</i> ]	0,35	0,09

**Fonte:** Próprio Autor

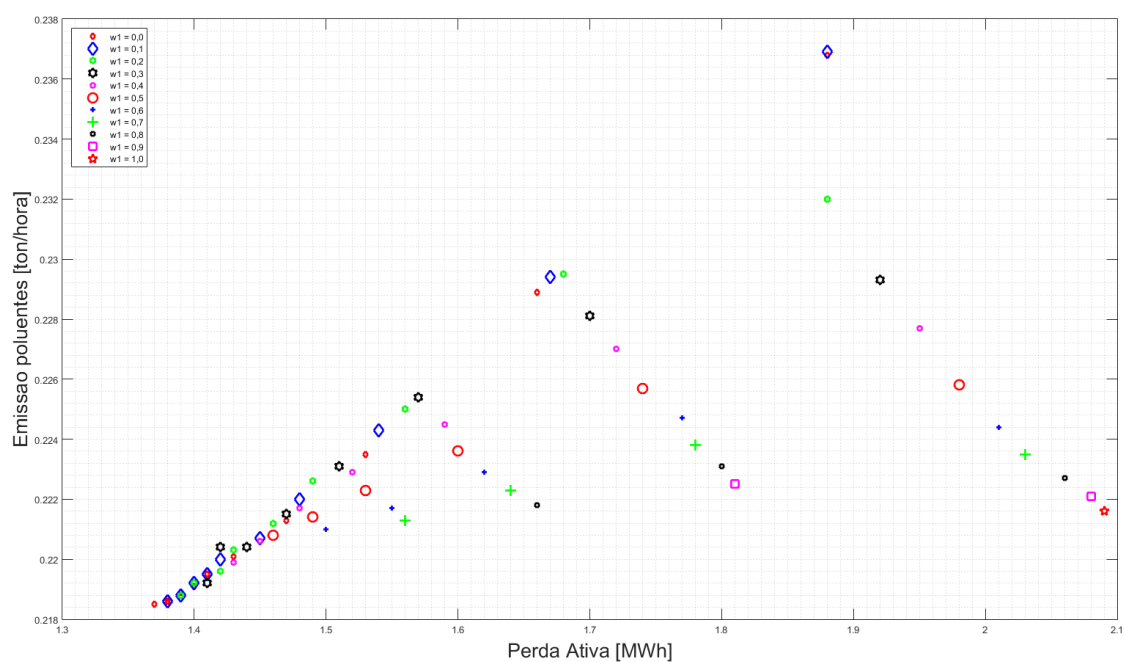


Tabela 5 – Sistema IEEE30 - Caso D2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}/hora$	$\$_{Ger}/hora$	$P_a/hora$	$P_r/hora$	$Em [ton/hora]$	<b>Tempo [seg]</b>
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>848,07</b>	<b>619,51</b>	<b>1,90</b>	<b>-21,70</b>	<b>0,2048</b>	<b>0,08</b>
0,00	0,10	0,90	791,17	634,63	1,30	-15,07	0,2188	0,06
0,00	0,20	0,80	791,30	634,79	1,30	-14,98	0,2189	0,09
0,00	0,30	0,70	791,35	634,85	1,30	-14,95	0,2189	0,25
0,00	0,40	0,60	791,38	634,88	1,30	-14,93	0,2189	0,13
0,00	0,50	0,50	791,40	634,90	1,30	-14,92	0,2189	0,17
0,00	0,60	0,40	791,42	634,92	1,30	-14,91	0,2189	0,25
0,00	0,70	0,30	791,43	634,93	1,30	-14,91	0,2189	0,09
0,00	0,80	0,20	791,44	634,94	1,30	-14,90	0,2189	0,14
0,00	0,90	0,10	791,45	634,95	1,30	-14,90	0,2189	0,14
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>791,46</b>	<b>634,95</b>	<b>1,30</b>	<b>-14,90</b>	<b>0,2189</b>	<b>0,14</b>
0,10	0,00	0,90	883,06	605,52	2,31	-17,62	0,2165	0,16
0,10	0,10	0,80	783,97	621,99	1,35	-19,47	0,2172	0,09
0,10	0,20	0,70	785,23	627,00	1,32	-18,09	0,2181	0,23
0,10	0,30	0,60	786,41	628,99	1,31	-17,28	0,2182	0,09
0,10	0,40	0,50	787,27	630,19	1,31	-16,79	0,2183	0,14
0,10	0,50	0,40	787,88	631,00	1,31	-16,47	0,2183	0,13
0,10	0,60	0,30	788,35	631,57	1,31	-16,24	0,2184	0,13
0,10	0,70	0,20	788,71	632,00	1,31	-16,06	0,2185	0,16
0,10	0,80	0,10	789,00	632,34	1,31	-15,93	0,2185	0,19
0,10	0,90	0,00	789,23	632,61	1,31	-15,82	0,2185	0,08
0,20	0,00	0,80	878,81	605,42	2,28	-17,87	0,2166	0,13
0,20	0,10	0,70	786,42	616,53	1,42	-20,57	0,2161	0,09
0,20	0,20	0,60	784,01	622,07	1,35	-19,45	0,2171	0,11
0,20	0,30	0,50	784,50	625,21	1,33	-18,66	0,2178	0,09
0,20	0,40	0,40	785,30	627,06	1,32	-18,07	0,2181	0,19
0,20	0,50	0,30	785,91	628,19	1,31	-17,61	0,2181	0,23
0,20	0,60	0,20	786,45	629,04	1,31	-17,26	0,2182	0,14
0,20	0,70	0,10	786,90	629,70	1,31	-16,99	0,2182	0,13
0,20	0,80	0,00	787,27	630,24	1,31	-16,77	0,2182	0,17
0,30	0,00	0,70	876,45	605,37	2,26	-18,03	0,2167	0,23
0,30	0,10	0,60	790,73	613,56	1,48	-21,02	0,2157	0,14
0,30	0,20	0,50	784,77	618,82	1,38	-20,15	0,2165	0,11
<b>0,30</b>	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>783,98</b>	<b>622,09</b>	<b>1,35</b>	<b>-19,44</b>	<b>0,2171</b>	<b>0,14</b>
0,30	0,40	0,30	784,27	624,35	1,33	-18,89	0,2176	0,11
0,30	0,50	0,20	784,83	626,01	1,32	-18,45	0,2180	0,14
0,30	0,60	0,10	785,28	627,07	1,32	-18,06	0,2181	0,09
0,30	0,70	0,00	785,69	627,87	1,32	-17,74	0,2181	0,25
0,40	0,00	0,60	875,18	605,35	2,25	-18,13	0,2167	0,16
0,40	0,10	0,50	795,02	611,73	1,53	-21,11	0,2155	0,20
0,40	0,20	0,40	786,39	616,56	1,42	-20,56	0,2161	0,14
0,40	0,30	0,30	784,38	619,78	1,37	-19,96	0,2166	0,09
0,40	0,40	0,20	784,01	622,10	1,35	-19,44	0,2171	0,17
0,40	0,50	0,10	784,18	623,86	1,34	-19,01	0,2175	0,17
0,40	0,60	0,00	784,53	625,25	1,33	-18,65	0,2178	0,17
0,50	0,00	0,50	875,17	605,35	2,25	-18,13	0,2167	0,09
0,50	0,10	0,40	799,13	610,49	1,57	-21,07	0,2154	0,19
0,50	0,20	0,30	788,58	614,86	1,45	-20,84	0,2158	0,06
0,50	0,30	0,20	785,20	618,00	1,39	-20,31	0,2163	0,20
0,50	0,40	0,10	784,23	620,31	1,37	-19,84	0,2167	0,13
0,50	0,50	0,00	784,01	622,11	1,35	-19,44	0,2171	0,16
0,60	0,00	0,40	875,16	605,34	2,25	-18,13	0,2167	0,16
0,60	0,10	0,30	803,14	609,59	1,61	-20,99	0,2153	0,16
0,60	0,20	0,20	790,64	613,57	1,48	-20,99	0,2157	0,14
0,60	0,30	0,10	786,44	616,57	1,42	-20,55	0,2161	0,09
0,60	0,40	0,00	784,77	618,85	1,38	-20,15	0,2165	0,19
0,70	0,00	0,30	875,24	605,35	2,25	-18,13	0,2167	0,09
0,70	0,10	0,20	802,02	608,84	1,61	-20,89	0,2153	0,06
0,70	0,20	0,10	792,88	612,55	1,50	-21,06	0,2156	0,06
0,70	0,30	0,00	787,76	615,38	1,44	-20,76	0,2159	0,06
0,80	0,00	0,20	875,09	605,34	2,25	-18,12	0,2167	0,13
0,80	0,10	0,10	809,29	608,39	1,67	-20,78	0,2153	0,09
0,80	0,20	0,00	795,17	611,73	1,53	-21,09	0,2155	0,22
0,90	0,00	0,10	874,96	605,34	2,25	-18,10	0,2167	0,16
0,90	0,10	0,00	813,59	608,00	1,71	-20,66	0,2153	0,11
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>874,79</b>	<b>605,34</b>	<b>2,25</b>	<b>-18,09</b>	<b>0,2167</b>	<b>0,08</b>

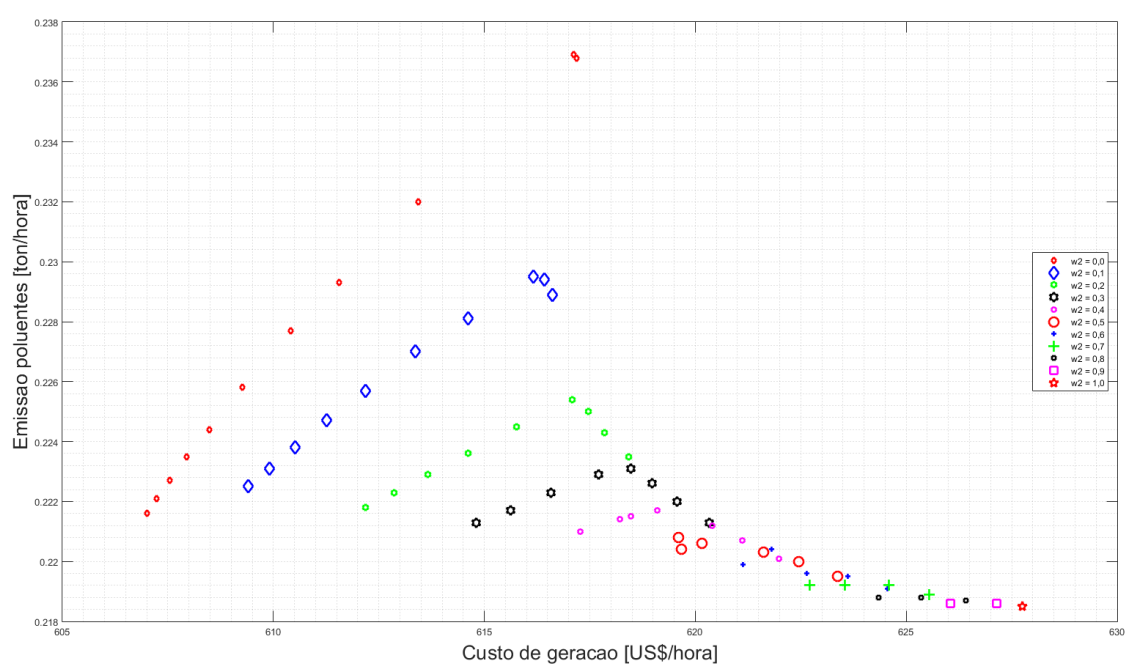
Fonte: Próprio Autor

Figura 15 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2



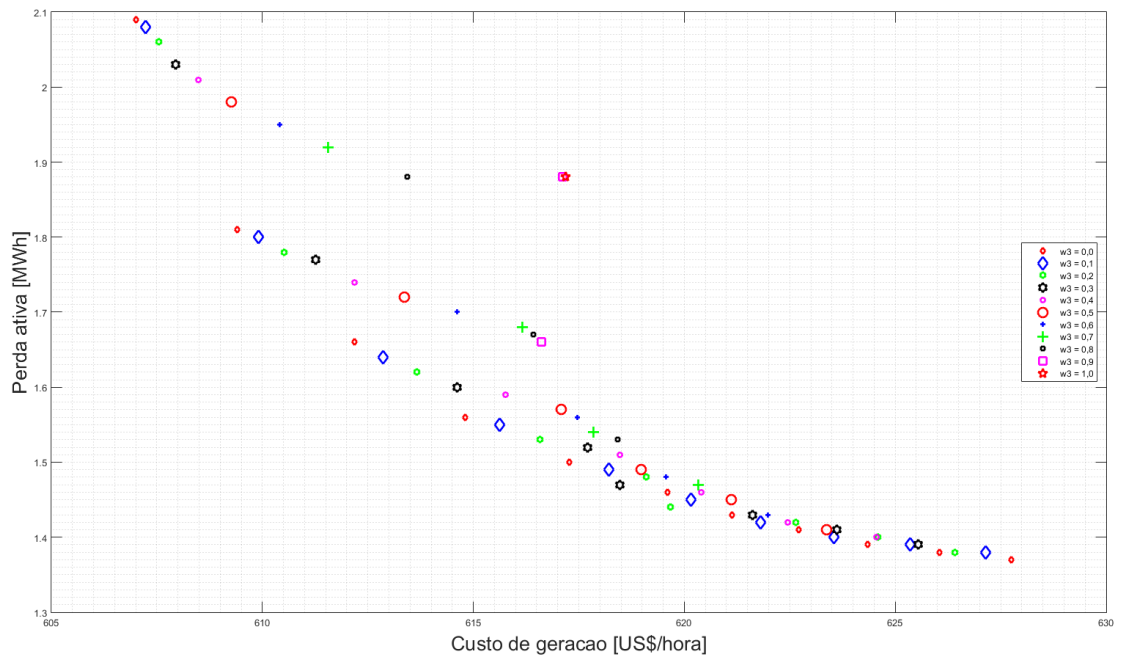
Fonte: Próprio Autor

Figura 16 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2



**Fonte:** Próprio Autor

O sistema IEEE30 é um sistema de pequeno porte com pouca quantidade de transformadores com controle de ganho de tensão, portanto pode ser considerado de pouca complexidade computacional. As soluções obtidas tanto pelo *software* MATPOWER® quanto pelo modelo determinístico do caso D1 apresentam custos de geração de energia e valores de perda ativa muito próximas. Contudo, o modelo determinístico proposto fornece soluções com menores custo de geração de energia e perda ativa em relação ao fornecido pelo *software* MATPOWER®.

Na Tabela (5) verifica-se que o menor custo total de geração é obtido nas ponderações  $w_1 = 0,30$ ,  $w_2 = 0,30$  e  $w_3 = 0,40$ , no entanto, seus valores de perda ativa e emissão de poluentes são elevados. Com base no conjunto de soluções da Tabela (5), caso necessário, o operador do sistema pode selecionar soluções alternativas com valor de custo de geração maior, porém, com valores de perda ativa e emissão de poluentes inferiores à solução de custo de geração mínimo.

Nas Figuras (15) e (16) ilustram-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluente e custo de geração e emissão de poluentes adotando valores fixos de  $w_1$  e  $w_2$ , respectivamente. Contudo, caso as ponderações  $w_1$  e  $w_2$  variem seus valores verificam-se o comportamento conflitante entres as FOs.

Na Figura (17) verifica-se o comportamento conflitante dos custos de geração e perda ativa para diferentes valores de  $w_3$ , incluindo a interferência dos diferentes valores

de  $w_3$  nos custos de geração e perda ativa.

## 5.2 MODELO DETERMINÍSTICO - SISTEMA IEEE118

Na Tabela (6) apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações do caso D1 e pelo *software* MATPOWER<sup>®</sup>, adotando os mesmos custos de geração fornecidos pelo banco de dados do MATPOWER<sup>®</sup>, a faixa de  $[0,96, 1,04]$  [p.u] para a magnitude das tensões e tolerância angular de  $0,25$  [grau].

Na Tabela (7) apresentam-se os resultados obtidos pelo modelo determinístico multiobjetivo para caso D2 considerando os custos de geração da Tabela (39) e adotando a faixa de  $[0,96, 1,02]$  [p.u] para as magnitudes das tensões.

Nas Figuras (18), (19) e (20) verificam-se graficamente os resultados Tabela (7) fixando um dos pesos da função objetivo para facilitar a análise do comportamento dos diferentes termos da função objetivo em função das ponderações.

Tabela 6 – Sistema IEEE118 - Caso D1 e MATPOWER<sup>®</sup>

	<b>MATPOWER<sup>®</sup></b>	<b>D1</b>
$\$_{Ger}$ [US\$/hora]	129660,70	129760,67
$P_a$ [MWh]	77,40	78,42
$P_r$ [MVArh]	-957,34	-711,65
<b>Tempo</b> [seg]	0,43	0,40

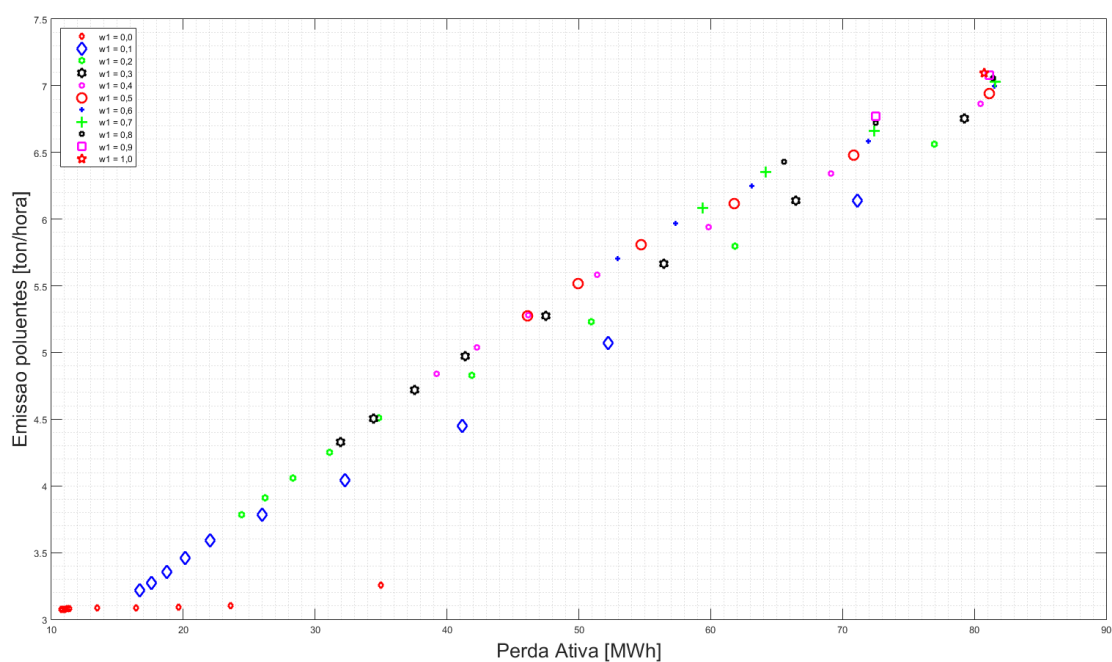
**Fonte:** Próprio Autor

Tabela 7 – Sistema IEEE118 - Caso D2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}/hora$	$\$_{Ger}/hora$	$P_a/hora$	$P_r/hora$	$Em [ton/hora]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>171661,25</b>	<b>166964,60</b>	<b>39,14</b>	<b>-990,03</b>	<b>2,2504</b>	<b>0,44</b>
0,00	0,10	0,90	167344,24	166159,72	9,87	-798,48	3,0381	0,44
0,00	0,20	0,80	167370,99	166205,58	9,71	-773,89	3,0497	0,36
0,00	0,30	0,70	167379,51	166220,88	9,66	-764,16	3,0547	0,52
0,00	0,40	0,60	167382,04	166227,37	9,62	-760,26	3,0578	0,53
0,00	0,50	0,50	167382,15	166229,95	9,60	-757,60	3,0599	0,59
0,00	0,60	0,40	167382,04	166231,57	9,59	-756,20	3,0615	0,59
0,00	0,70	0,30	167384,01	166234,85	9,58	-757,02	3,0628	0,45
0,00	0,80	0,20	167382,77	166234,01	9,57	-759,50	3,0625	0,66
0,00	0,90	0,10	167386,97	166238,88	9,57	-762,11	3,0634	0,52
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>167405,40</b>	<b>166257,85</b>	<b>9,56</b>	<b>-760,99</b>	<b>3,0672</b>	<b>0,56</b>
0,10	0,00	0,90	139325,73	129814,41	79,26	-544,14	7,1939	0,44
0,10	0,10	0,80	136762,79	131375,85	44,89	-611,98	5,2911	0,55
0,10	0,20	0,70	137365,02	133394,69	33,09	-645,64	4,5192	0,39
0,10	0,30	0,60	138424,33	135189,80	26,95	-668,93	4,0772	0,36
0,10	0,40	0,50	139513,25	136726,43	23,22	-686,15	3,8062	0,58
0,10	0,50	0,40	140579,17	138100,10	20,66	-698,84	3,6109	0,47
0,10	0,60	0,30	141549,99	139290,02	18,83	-708,75	3,4720	0,47
0,10	0,70	0,20	142450,33	140353,78	17,47	-713,54	3,3582	0,47
0,10	0,80	0,10	143287,77	141320,94	16,39	-716,77	3,2699	0,50
0,10	0,90	0,00	144017,75	142149,69	15,57	-718,79	3,2087	0,58
0,20	0,00	0,80	139294,63	129794,08	79,17	-492,82	7,2148	0,50
0,20	0,10	0,70	137109,55	130369,22	56,17	-553,66	5,9883	0,52
0,20	0,20	0,60	136739,03	131358,38	44,84	-594,52	5,2984	0,50
0,20	0,30	0,50	136930,51	132391,89	37,82	-621,51	4,8545	0,39
0,20	0,40	0,40	137348,41	133383,25	33,04	-638,85	4,5236	0,55
0,20	0,50	0,30	137865,96	134319,59	29,55	-651,57	4,2734	0,61
0,20	0,60	0,20	138412,64	135182,15	26,92	-662,37	4,0802	0,45
0,20	0,70	0,10	138962,14	135977,85	24,87	-670,56	3,9303	0,59
0,20	0,80	0,00	139506,37	136720,91	23,21	-676,65	3,8083	0,73
0,30	0,00	0,70	139278,39	129785,64	79,11	-469,95	7,2220	0,45
0,30	0,10	0,60	137490,56	130092,51	61,65	-516,42	6,3045	0,61
0,30	0,20	0,50	136883,40	130664,39	51,83	-548,16	5,7370	0,67
0,30	0,30	0,40	136733,16	131354,10	44,83	-575,13	5,3005	0,48
0,30	0,40	0,30	136826,79	132050,33	39,80	-595,30	4,9832	0,39
0,30	0,50	0,20	137048,07	132722,02	36,05	-612,18	4,7372	0,52
0,30	0,60	0,10	137345,86	133380,99	33,04	-625,86	4,5247	0,67
0,30	0,70	0,00	137682,78	134008,89	30,62	-636,79	4,3525	0,53
0,40	0,00	0,60	139272,40	129782,20	79,08	-451,54	7,2252	0,42
0,40	0,10	0,50	137773,48	129973,04	65,00	-488,24	6,4923	0,42
0,40	0,20	0,40	137098,91	130361,65	56,14	-517,50	5,9926	0,50
0,40	0,30	0,30	136810,26	130830,78	49,83	-540,96	5,6149	0,45
0,40	0,40	0,20	136730,76	131352,14	44,82	-563,62	5,3014	0,53
0,40	0,50	0,10	136786,59	131876,34	40,92	-582,19	5,0545	0,53
0,40	0,60	0,00	136923,89	132387,67	37,80	-597,14	4,8562	0,64
0,50	0,00	0,50	139268,68	129780,11	79,07	-435,35	7,2272	0,41
0,50	0,10	0,40	137983,06	129910,34	67,27	-467,18	6,6173	0,45
0,50	0,20	0,30	137304,44	130192,08	59,27	-494,07	6,1736	0,47
0,50	0,30	0,20	136950,43	130538,36	53,43	-517,17	5,8348	0,66
0,50	0,40	0,10	136778,92	130932,60	48,72	-539,23	5,5463	0,66
<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>136729,14</b>	<b>131351,00</b>	<b>44,82</b>	<b>-557,82</b>	<b>5,3018</b>	<b>0,56</b>
0,60	0,00	0,40	139266,68	129778,83	79,07	-421,94	7,2286	0,61
0,60	0,10	0,30	138142,55	129873,36	68,91	-450,38	6,7064	0,50
0,60	0,20	0,20	137483,74	130087,09	61,64	-475,32	6,3082	0,45
0,60	0,30	0,10	137096,27	130359,29	56,14	-499,17	5,9941	0,42
0,60	0,40	0,00	136878,36	130659,99	51,82	-519,56	5,7394	0,61
0,70	0,00	0,30	139264,74	129777,76	79,06	-410,95	7,2296	0,69
0,70	0,10	0,20	138266,66	129849,67	70,14	-436,80	6,7726	0,56
0,70	0,20	0,10	137637,70	130017,57	63,50	-460,26	6,4124	0,58
0,70	0,30	0,00	137236,48	130237,13	58,33	-484,20	6,1209	0,58
0,80	0,00	0,20	139263,96	129777,10	79,06	-401,63	7,2304	0,61
0,80	0,10	0,10	138366,45	129833,58	71,11	-425,39	6,8240	0,41
0,80	0,20	0,00	137769,25	129969,00	65,00	-448,91	6,4956	0,45
0,90	0,00	0,10	139262,91	129776,47	79,05	-393,64	7,2310	0,78
0,90	0,10	0,00	138447,47	129821,96	71,88	-416,21	6,8652	0,52
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>139263,82</b>	<b>129776,38</b>	<b>79,06</b>	<b>-386,49</b>	<b>7,2316</b>	<b>0,42</b>

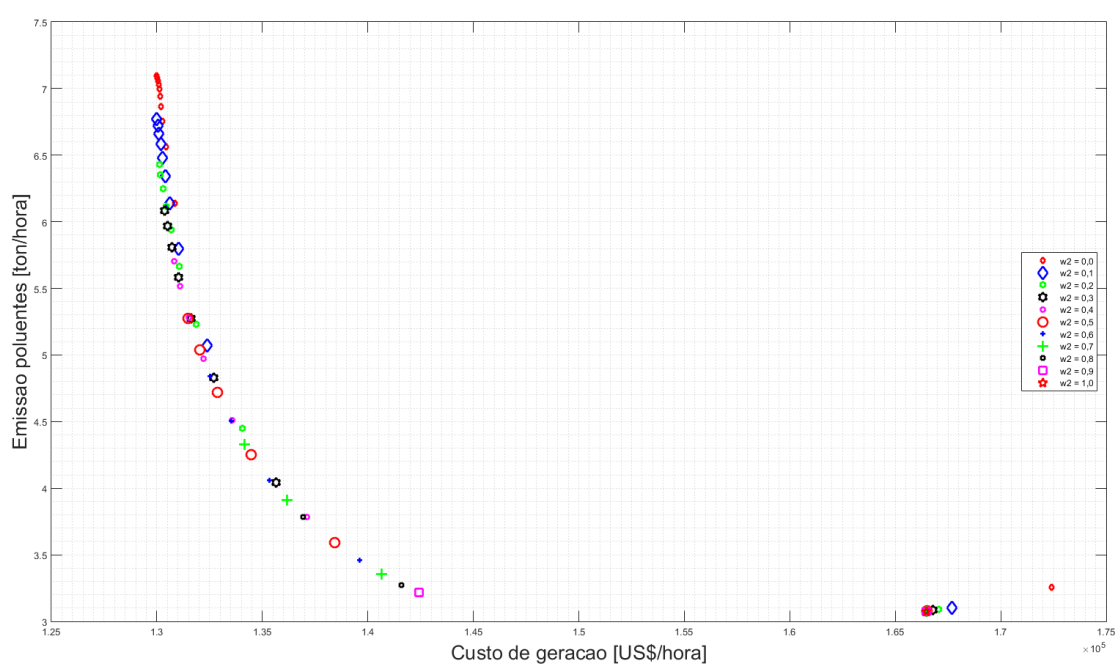
Fonte: Próprio Autor

Figura 18 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2



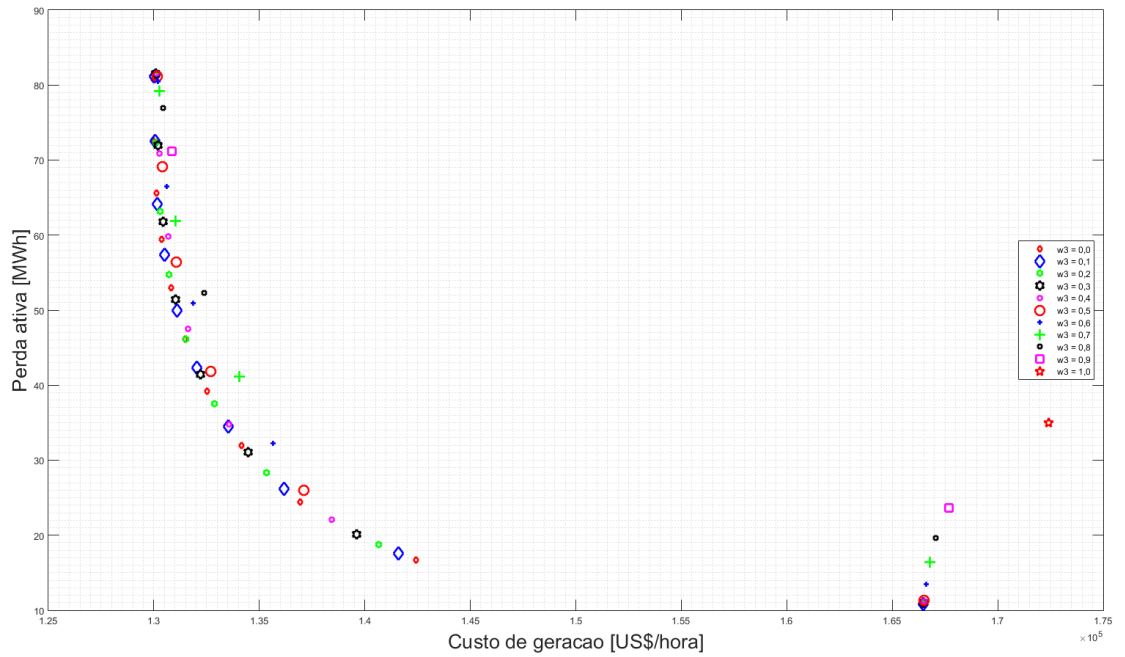
Fonte: Próprio Autor

Figura 19 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2



Fonte: Próprio Autor

Figura 20 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2



**Fonte:** Próprio Autor

O sistema IEEE118 é um sistema de médio porte com pouca quantidade de transformadores com controle de ganho de tensão e elevada geração de potência reativa apresentando complexidade computacional média.

As soluções obtidas pelo modelo determinístico proposto apresentam custos de geração de energia e valores de perdas ativa iguais aos resultados fornecidos pelo *software* MATPOWER®. No entanto, devido à elevada geração de potência reativa o modelo determinístico encontra dificuldades para localizar soluções factíveis.

Na Tabela (7) verifica-se que para as ponderações  $w_1 = 0,50$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,00$  obtém-se o menor valor de custo de geração de energia, mas com valores de perda ativa e emissão de poluentes elevados. Baseando-se no conjunto de soluções da Tabela (7), caso necessário, o operador do sistema pode seleccionar soluções com o custo de geração de energia maior, porém, com valores de perda ativa e emissão de poluentes inferiores à solução de custo de geração mínimo.

Na Figura (18) ilustra-se o comportamento não conflitante entre os valores de perda ativa e emissão de poluentes para valores fixos de  $w_1$ . Porém, ao variar os valores da ponderação  $w_1$  verifica-se o comportamento conflitante entre as FOs de perda ativa e emissão de poluentes.

Nas Figuras (19) e (20) apresentam-se os comportamentos conflitantes entre os

valores de custo de geração e emissão de poluentes ao meio ambiente e do custo de geração e perdas ativas, para cada valor fixo das ponderações  $w_2$  e  $w_3$ .

### 5.3 MODELO DETERMINÍSTICO - SISTEMA ACTIVSG200

Na Tabela (8) apresentam-se os resultados obtidos nas simulações para o caso D1 e para o *software* MATPOWER<sup>®</sup>, considerando os mesmos custos de geração fornecidos pelo banco de dados do MATPOWER<sup>®</sup>, a faixa de  $[0,95, 1,05]$  [p.u] para a magnitude das tensões e tolerância angular de  $0,25$  [grau].

Na Tabela (9) apresentam-se os resultados obtidos pelo modelo determinístico multiobjetivo do caso D2 adotando os custos de geração da Tabela (45) e considerando a faixa de  $[0,97, 1,03]$  [p.u] para a magnitude das tensões.

Nas Figuras (21), (22) e (23) apresentam-se graficamente os resultados da Tabela (7) fixando um dos pesos da função objetivo, para facilitar a análise destes resultados.

Tabela 8 – Sistema ACTIVSg200 - Caso D1 e MATPOWER<sup>®</sup>

	MATPOWER <sup>®</sup>	D1
$\$_{Ger}$ [US\$/hora]	36668,89	36668,11
$P_a$ [MWh]	10,02	9,90
$P_r$ [MVArh]	-129,74	-127,33
<b>Tempo</b> [seg]	0,53	0,42

**Fonte:** Próprio Autor

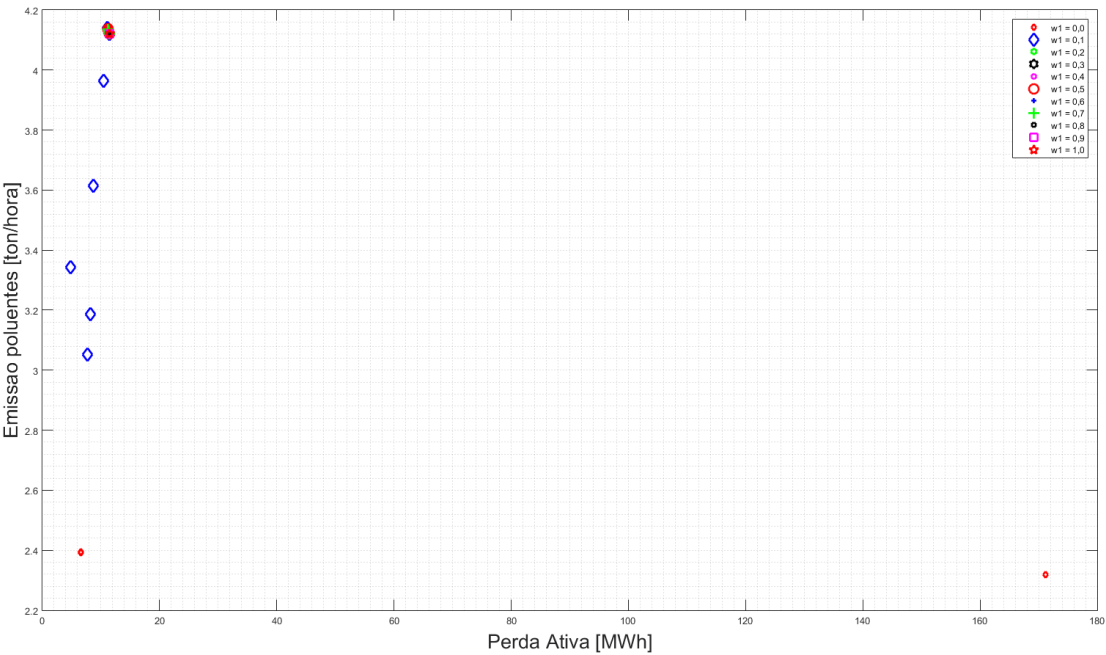


Tabela 9 – Sistema ACTIVSg200 - Caso D2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}/hora$	$\$_{Ger}/hora$	$P_a/hora$	$P_r/hora$	$Em [ton/hora]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>76408,71</b>	<b>55865,12</b>	<b>171,20</b>	<b>976,78</b>	<b>2,3192</b>	<b>0,27</b>
0,00	0,10	0,90	53240,32	52448,66	6,60	-154,79	2,3910	0,52
0,00	0,20	0,80	53223,54	52433,73	6,58	-154,89	2,3933	0,56
0,00	0,30	0,70	53217,53	52428,42	6,58	-154,91	2,3941	0,52
0,00	0,40	0,60	53214,59	52425,80	6,57	-154,94	2,3945	0,47
0,00	0,50	0,50	53216,11	52425,08	6,59	-154,84	2,3947	0,84
0,00	0,60	0,40	53208,56	52422,47	6,55	-155,04	2,3950	0,59
0,00	0,70	0,30	53208,24	52421,85	6,55	-155,03	2,3951	0,45
0,00	0,80	0,20	53212,31	52422,34	6,58	-154,88	2,3951	0,56
0,00	0,90	0,10	53210,82	52421,81	6,58	-154,93	2,3951	0,61
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>53208,34</b>	<b>52420,90</b>	<b>6,56</b>	<b>-154,99</b>	<b>2,3952</b>	<b>0,48</b>
0,10	0,00	0,90	48452,35	47081,96	11,42	-117,70	4,1199	0,64
0,10	0,10	0,80	48433,09	47085,20	11,23	-117,86	4,1365	0,63
0,10	0,20	0,70	48432,52	47085,65	11,22	-117,87	4,1380	0,58
0,10	0,30	0,60	48424,66	47084,98	11,16	-118,19	4,1387	0,63
<b>0,10</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>48416,73</b>	<b>47084,60</b>	<b>11,10</b>	<b>-118,50</b>	<b>4,1389</b>	<b>0,63</b>
0,10	0,50	0,40	48643,15	47392,34	10,42	-124,04	3,9645	0,53
0,10	0,60	0,30	49155,17	48115,09	8,67	-137,26	3,6152	0,61
0,10	0,70	0,20	49275,75	48704,57	4,76	-155,62	3,3419	0,73
0,10	0,80	0,10	50140,40	49159,43	8,17	-144,60	3,1872	0,66
0,10	0,90	0,00	50468,77	49538,35	7,75	-148,14	3,0516	0,61
0,20	0,00	0,80	48452,29	47081,99	11,42	-117,71	4,1200	0,42
0,20	0,10	0,70	48433,58	47084,66	11,24	-117,88	4,1349	0,58
0,20	0,20	0,60	48433,02	47085,20	11,23	-117,86	4,1366	0,75
0,20	0,30	0,50	48431,74	47085,36	11,22	-117,90	4,1375	0,42
0,20	0,40	0,40	48424,30	47084,63	11,16	-118,19	4,1380	0,84
0,20	0,50	0,30	48429,92	47085,49	11,20	-117,97	4,1384	0,67
0,20	0,60	0,20	48424,02	47084,91	11,16	-118,21	4,1387	0,67
0,20	0,70	0,10	48424,43	47085,10	11,16	-118,19	4,1389	0,77
0,20	0,80	0,00	48424,06	47085,27	11,16	-118,24	4,1390	0,59
0,30	0,00	0,70	48452,05	47081,96	11,42	-117,72	4,1200	0,56
0,30	0,10	0,60	48434,87	47083,96	11,26	-117,95	4,1323	0,56
0,30	0,20	0,50	48431,41	47084,64	11,22	-117,94	4,1356	0,50
0,30	0,30	0,40	48432,03	47085,08	11,22	-117,90	4,1366	0,55
0,30	0,40	0,30	48429,76	47085,02	11,21	-117,98	4,1372	0,63
0,30	0,50	0,20	48431,96	47085,47	11,22	-117,89	4,1377	0,72
0,30	0,60	0,10	48423,07	47084,48	11,15	-118,23	4,1381	0,64
0,30	0,70	0,00	48423,23	47084,62	11,16	-118,23	4,1383	0,42
0,40	0,00	0,60	48451,91	47081,95	11,42	-117,72	4,1200	0,47
0,40	0,10	0,50	48436,65	47083,43	11,28	-117,99	4,1300	0,56
0,40	0,20	0,40	48433,37	47084,64	11,24	-117,89	4,1349	0,56
0,40	0,30	0,30	48432,00	47084,82	11,23	-117,91	4,1359	0,50
0,40	0,40	0,20	48432,64	47085,16	11,23	-117,88	4,1366	0,48
0,40	0,50	0,10	48432,56	47085,33	11,23	-117,87	4,1371	0,61
0,40	0,60	0,00	48432,12	47085,42	11,22	-117,89	4,1375	0,58
0,50	0,00	0,50	48451,76	47081,98	11,42	-117,73	4,1201	0,78
0,50	0,10	0,40	48437,85	47083,06	11,29	-118,02	4,1284	0,55
0,50	0,20	0,30	48434,42	47084,46	11,25	-117,88	4,1340	0,84
0,50	0,30	0,20	48433,17	47084,78	11,24	-117,88	4,1354	0,50
0,50	0,40	0,10	48432,26	47084,91	11,23	-117,90	4,1361	0,45
0,50	0,50	0,00	48432,57	47085,15	11,23	-117,88	4,1366	0,66
0,60	0,00	0,40	48452,04	47081,97	11,42	-117,72	4,1201	0,58
0,60	0,10	0,30	48438,88	47082,81	11,30	-118,02	4,1273	0,67
0,60	0,20	0,20	48434,48	47083,93	11,25	-117,96	4,1324	0,42
0,60	0,30	0,10	48432,43	47084,51	11,23	-117,92	4,1350	0,64
0,60	0,40	0,00	48432,25	47084,75	11,23	-117,91	4,1356	0,81
0,70	0,00	0,30	48452,02	47081,97	11,42	-117,72	4,1201	0,95
0,70	0,10	0,20	48440,00	47082,66	11,31	-118,01	4,1264	0,39
0,70	0,20	0,10	48434,94	47083,56	11,26	-118,00	4,1311	0,67
0,70	0,30	0,00	48433,85	47084,55	11,24	-117,88	4,1345	0,83
0,80	0,00	0,20	48452,00	47081,97	11,42	-117,72	4,1201	0,67
0,80	0,10	0,10	48440,58	47082,50	11,32	-118,02	4,1257	0,61
0,80	0,20	0,00	48440,58	47082,50	11,32	-118,02	4,1257	0,05
0,90	0,00	0,10	48451,98	47081,98	11,42	-117,72	4,1201	0,50
0,90	0,10	0,00	48451,98	47081,98	11,42	-117,72	4,1201	0,03
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>48452,08</b>	<b>47081,98</b>	<b>11,42</b>	<b>-117,72</b>	<b>4,1201</b>	<b>0,59</b>

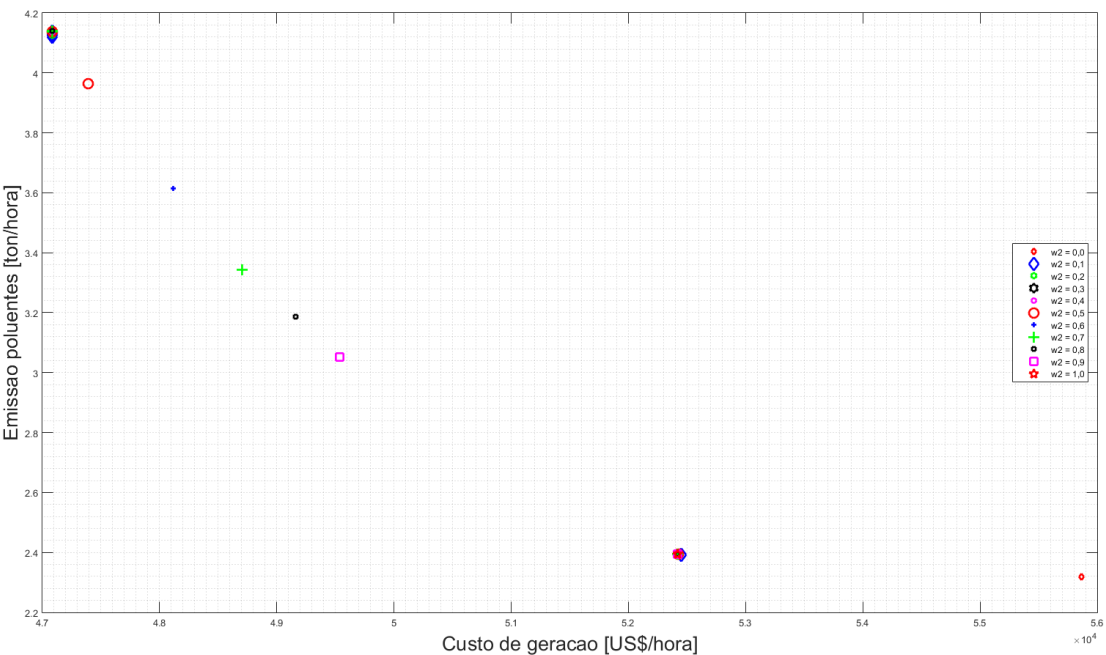
Fonte: Próprio Autor

Figura 21 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso D2



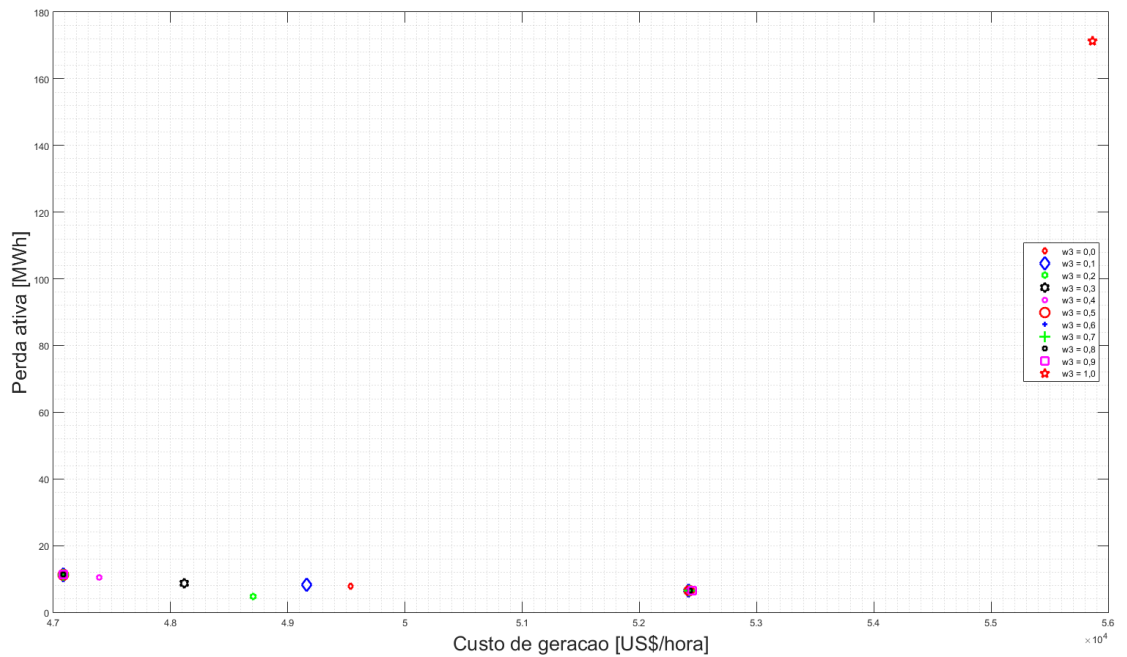
Fonte: Próprio Autor

Figura 22 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso D2



Fonte: Próprio Autor

Figura 23 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso D2



**Fonte:** Próprio Autor

O sistema ACTIVSg200 é um sistema de médio porte com uma considerável quantidade de transformadores com controle de tensão, apresentando grande complexidade computacional.

As soluções obtidas pelos modelo determinístico desenvolvido e pelo *software* MATPOWER<sup>®</sup> apresentam resultados de custos de geração e perda ativa praticamente iguais. O modelo determinístico para o caso D1 apresenta resultados com menores valores de custo de geração e perda ativa que os fornecidos pelo *software* MATPOWER<sup>®</sup>.

Na Tabela (9) verifica-se que o menor valor de custo de geração de energia ocorre nas ponderações  $w_1 = 0,20$ ,  $w_2 = 0,30$  e  $w_3 = 0,50$ , no entanto os valores de perda ativa e emissão de poluentes são elevados.

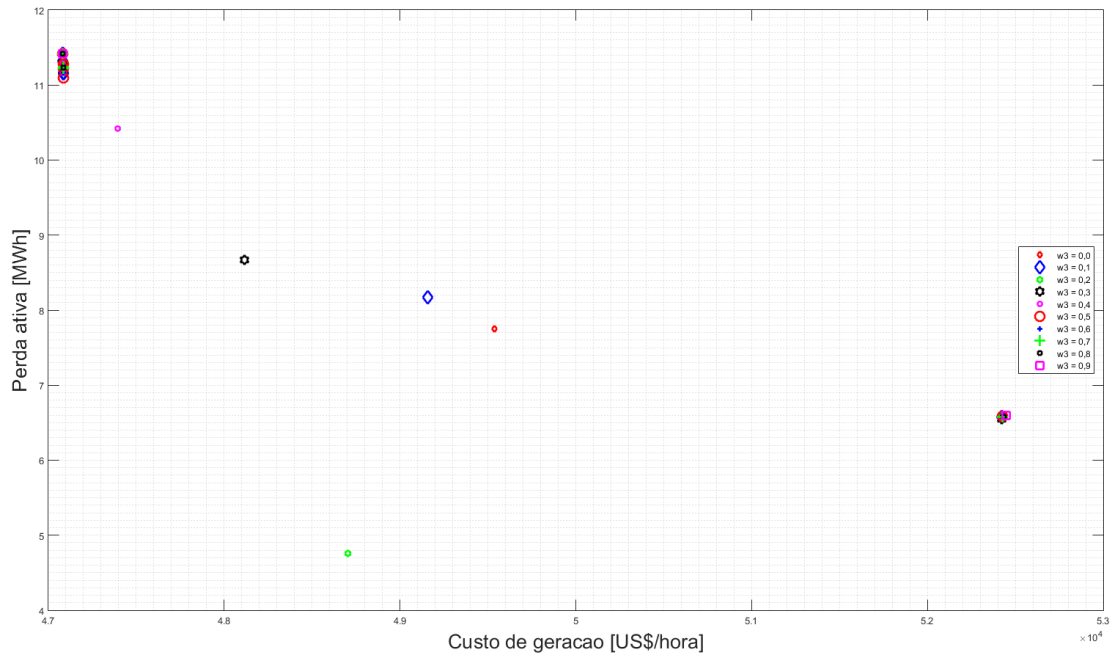
O conjunto de soluções da Tabela (9), possibilita que o operador do sistema selecione uma solução alternativa com custo de geração maior, mas com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores.

Na Figura (21), apresenta-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes, fixando-se o valor do parâmetro de ponderação do termo de custo de geração de energia.

Na Figura (22), ilustra-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e emissão de poluentes.

Para  $w_3 = 1,00$ , na Figura (23) não é possível verificar o comportamento dos termos de custo de geração e perda ativa. Na Figura (24) apresenta-se o comportamento da Figura (23) desconsiderando o valor de  $w_3 = 1,00$ .

Figura 24 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso D2



**Fonte:** Próprio Autor

Na Figura (23) verifica-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração de energia e perda ativa no sistema.

#### 5.4 MODELO ESTOCÁSTICO

Os modelos de turbina eólica e painel fotovoltaico utilizados na simulação apresentam as seguintes características técnicas:

- VESTAS v80 de 2000 [kW]
  - $v_I = 2$  [m/seg],  $v_S = 14$  [m/seg],  $v_o = 25$  [m/seg];
  - 52 torres eólicas para a geração de aproximadamente 1 [GW<sub>nom</sub>].
- GCL-P6/72 de 330 [W]
  - $NOCT = 45$  [°C];
  - Coeficiente de temperatura ( $\partial$ ) =  $-0,39$  [%/°C];

- O valor adotado para a temperatura ambiente foi definidos através da análise estocástica de cada bloco de tempo;
- 300 mil painéis para a geração de aproximadamente 1 [GW] nominal.

Os respectivos valores dos custos de geração são apresentados no Anexo (A).

#### 5.4.1 Verificação da estratégia utilizada no modelo estocástico

Nesta seção verifica-se a precisão e eficiência da estratégia de redução de cenários apresentada em (4.4.1) comparando as soluções obtidas para o sistema IEEE30 resolvido através do modelo determinístico a cada hora, totalizando um ano, 8760 horas e através do modelo estocástico minimizando cada uma das funções objetivo individualmente. Ambos os modelos consideraram a faixa de  $[0,95, 1,05]$  [p.u] para a magnitude das tensões, tolerância angular de 0,25 [grau] e os custos de geração da Tabela (33).

Nas Tabelas (10), (11) e (12) apresentam-se os resultados obtidos pelos modelos determinístico e estocástico na minimização individual das funções objetivos  $FO_1$ ,  $FO_2$  e  $FO_3$ , respectivamente.

Tabela 10 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a  $FO_1$

Modelo	Determinístico	Estocástico
$\$_{Ger}$ [US\$]*	4894322,14	4894024,38
$P_a$ [MW]	17171,03	17164,69
$Em$ [ton]	1907,52	1907,42
<b>Tempo</b> [seg]	1073,44	15,28

**Fonte:** Próprio Autor

Tabela 11 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a  $FO_2$

Modelo	Determinístico	Estocástico
$\$_{Ger}$ [US\$]	5159136,25	5158375,31
$P_a$ [MW]*	9502,32	9371,06
$Em$ [ton]	1912,34	1911,85
<b>Tempo</b> [seg]	1215,12	12,67

**Fonte:** Próprio Autor

Tabela 12 – Comparação dos resultados dos modelos determinístico e estocástico para a  $FO_3$ 

Modelo	Determinístico	Estocástico
$\$_{Ger}$ [US\$]	5872844,74	5873266,82
$P_a$ [MW]	309126,20	309396,95
$Em$ [ton]*	1699,38	1699,36
<b>Tempo</b> [seg]	743,47	9,97

Fonte: Próprio Autor

Os resultados apresentados nas Tabelas (10), (11) e (12) mostram que o modelo estocástico desenvolvido apresenta resultados praticamente idênticos aos resultados obtidos pelo modelo determinístico com tempos computacionais extremamente inferiores.

### 5.5 MODELO ESTOCÁSTICO - SISTEMA IEEE30

O sistema IEEE30 é simulado adotando a faixa de  $[0,95, 1,05]$  [p.u] para a magnitude de variação das tensões, tolerância angular de  $0,25$  [grau], e utilizando os dados estocásticos de blocos de tempos, níveis de demanda, velocidade de vento, irradiação solar e suas respectivas probabilidades apresentados na Tabela (35) do Anexo (A).

Nas Tabelas (13), (15) e (17) encontram-se os custos totais de geração, custos de geração renovável, custos de geração não renovável, perdas ativas, perdas reativas e tempo computacional para os casos E1, E2 e E3, respectivamente.

Nas Figuras (25) - (27), (29) - (31) e (33) - (35) apresentam-se graficamente os resultados obtidos nas Tabelas (13), (15) e (17), respectivamente, fixando os pesos de uma das componentes da função objetivo.

Tabela 13 – Sistema IEEE30 - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{Ger_{N.Ren}}$	$10^3 \$_{Ger_{Ren}}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>42901370,71</b>	<b>5871,45</b>	<b>0,00</b>	<b>308,58</b>	<b>6,39</b>	<b>16,9938</b>	<b>4,02</b>
0,00	0,10	0,90	6257584,96	5134,77	0,00	9,36	-2,10	19,0285	9,64
0,00	0,20	0,80	6259679,91	5134,97	0,00	9,37	-2,10	19,0322	11,48
0,00	0,30	0,70	6265392,07	5135,20	0,00	9,42	-2,11	19,0343	9,17
0,00	0,40	0,60	6265043,64	5135,14	0,00	9,42	-2,11	19,0342	10,13
0,00	0,50	0,50	6263547,34	5135,11	0,00	9,40	-2,11	19,0343	11,66
0,00	0,60	0,40	6254373,67	5134,79	0,00	9,33	-2,10	19,0330	10,88
0,00	0,70	0,30	6265197,74	5135,22	0,00	9,42	-2,11	19,0354	11,09
0,00	0,80	0,20	6265685,75	5135,25	0,00	9,42	-2,11	19,0356	10,94
0,00	0,90	0,10	6264387,40	5135,17	0,00	9,41	-2,11	19,0351	10,75
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6266334,26</b>	<b>5135,22</b>	<b>0,00</b>	<b>9,43</b>	<b>-2,11</b>	<b>19,0355</b>	<b>8,14</b>
0,10	0,00	0,90	6634630,40	4926,95	0,00	14,23	-2,14	18,2346	20,80
<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,80</b>	<b>6219546,50</b>	<b>5032,46</b>	<b>0,00</b>	<b>9,89</b>	<b>-2,32</b>	<b>18,8959</b>	<b>12,36</b>
0,10	0,20	0,70	6232534,34	5073,95	0,00	9,65	-2,24	18,9472	13,14
0,10	0,30	0,60	6242981,19	5092,52	0,00	9,59	-2,20	18,9757	12,28
0,10	0,40	0,50	6241504,08	5102,38	0,00	9,49	-2,17	18,9898	12,55
0,10	0,50	0,40	6248231,16	5108,71	0,00	9,50	-2,16	18,9986	11,31
0,10	0,60	0,30	6248283,18	5112,83	0,00	9,46	-2,15	19,0039	11,94
0,10	0,70	0,20	6251483,55	5115,92	0,00	9,46	-2,14	19,0082	11,95
0,10	0,80	0,10	6247907,05	5118,19	0,00	9,41	-2,13	19,0111	11,22
0,10	0,90	0,00	6240414,53	5119,75	0,00	9,34	-2,12	19,0124	10,81
0,20	0,00	0,80	6633939,47	4926,97	0,00	14,22	-2,13	18,2381	21,55
0,20	0,10	0,70	6241102,92	4986,04	0,00	10,46	-2,42	18,8653	11,42
0,20	0,20	0,60	6222060,15	5032,60	0,00	9,91	-2,32	18,8986	11,81
0,20	0,30	0,50	6225900,27	5058,17	0,00	9,73	-2,27	18,9284	11,98
0,20	0,40	0,40	6232402,41	5073,98	0,00	9,65	-2,23	18,9486	10,53
0,20	0,50	0,30	6238452,95	5084,87	0,00	9,61	-2,21	18,9646	10,97
0,20	0,60	0,20	6243254,96	5092,56	0,00	9,59	-2,20	18,9767	13,11
0,20	0,70	0,10	6246943,10	5098,40	0,00	9,57	-2,19	18,9863	11,63
0,20	0,80	0,00	6242683,47	5102,42	0,00	9,50	-2,17	18,9907	11,64
0,30	0,00	0,70	6633339,66	4926,97	0,00	14,22	-2,13	18,2393	17,86
0,30	0,10	0,60	6267938,10	4967,29	0,00	10,84	-2,43	18,8125	11,28
0,30	0,20	0,50	6227638,20	5005,15	0,00	10,19	-2,38	18,8767	13,67
0,30	0,30	0,40	6221782,09	5032,60	0,00	9,91	-2,32	18,8995	10,81
0,30	0,40	0,30	6223983,33	5051,13	0,00	9,77	-2,28	18,9212	11,83
0,30	0,50	0,20	6228202,15	5064,30	0,00	9,70	-2,25	18,9365	11,11
0,30	0,60	0,10	6232386,87	5073,99	0,00	9,65	-2,23	18,9490	13,16
0,30	0,70	0,00	6236675,20	5081,67	0,00	9,63	-2,22	18,9602	13,38
0,40	0,00	0,60	6632687,98	4926,96	0,00	14,21	-2,13	18,2399	19,81
0,40	0,10	0,50	6288897,96	4958,70	0,00	11,08	-2,42	18,7378	12,36
0,40	0,20	0,40	6241972,05	4986,06	0,00	10,47	-2,42	18,8675	12,42
0,40	0,30	0,30	6224002,83	5013,12	0,00	10,09	-2,37	18,8827	11,77
0,40	0,40	0,20	6222016,68	5032,61	0,00	9,91	-2,32	18,8999	11,72
0,40	0,50	0,10	6223065,30	5047,11	0,00	9,80	-2,29	18,9168	12,16
0,40	0,60	0,00	6226080,83	5058,20	0,00	9,73	-2,27	18,9293	13,28
0,50	0,00	0,50	6632965,01	4926,97	0,00	14,22	-2,13	18,2402	20,80
0,50	0,10	0,40	6307130,87	4953,82	0,00	11,28	-2,40	18,6692	12,81
0,50	0,20	0,30	6257332,77	4973,71	0,00	10,70	-2,43	18,8542	11,02
0,50	0,30	0,20	6231977,04	4998,09	0,00	10,28	-2,40	18,8735	12,58
0,50	0,40	0,10	6222470,08	5017,51	0,00	10,04	-2,36	18,8865	12,56
0,50	0,50	0,00	6221757,50	5032,60	0,00	9,91	-2,32	18,9001	13,09
0,60	0,00	0,40	6631822,79	4926,95	0,00	14,21	-2,13	18,2405	20,09
0,60	0,10	0,30	6333066,89	4948,04	0,00	11,54	-2,40	18,6368	10,89
0,60	0,20	0,20	6267759,46	4967,34	0,00	10,84	-2,43	18,8140	13,34
0,60	0,30	0,10	6242472,78	4986,07	0,00	10,47	-2,42	18,8681	12,02
0,60	0,40	0,00	6228495,57	5005,19	0,00	10,19	-2,39	18,8778	11,23
0,70	0,00	0,30	6631754,76	4926,95	0,00	14,21	-2,13	18,2406	18,73
0,70	0,10	0,20	6358227,62	4943,22	0,00	11,79	-2,39	18,6147	11,38
0,70	0,20	0,10	6279921,15	4962,35	0,00	10,98	-2,43	18,7759	13,19
0,70	0,30	0,00	6253080,83	4976,91	0,00	10,63	-2,43	18,8628	12,09
0,80	0,00	0,20	6632511,72	4926,97	0,00	14,21	-2,13	18,2408	19,88
0,80	0,10	0,10	6384310,77	4939,39	0,00	12,04	-2,38	18,5978	12,92
0,80	0,20	0,00	6288262,08	4958,74	0,00	11,08	-2,41	18,7389	10,30
0,90	0,00	0,10	6631677,76	4926,95	0,00	14,21	-2,13	18,2409	21,08
0,90	0,10	0,00	6399078,59	4937,33	0,00	12,18	-2,37	18,5721	13,48
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6631265,96</b>	<b>4926,95</b>	<b>0,00</b>	<b>14,20</b>	<b>-2,13</b>	<b>18,2409</b>	<b>20,70</b>

Fonte: Próprio Autor

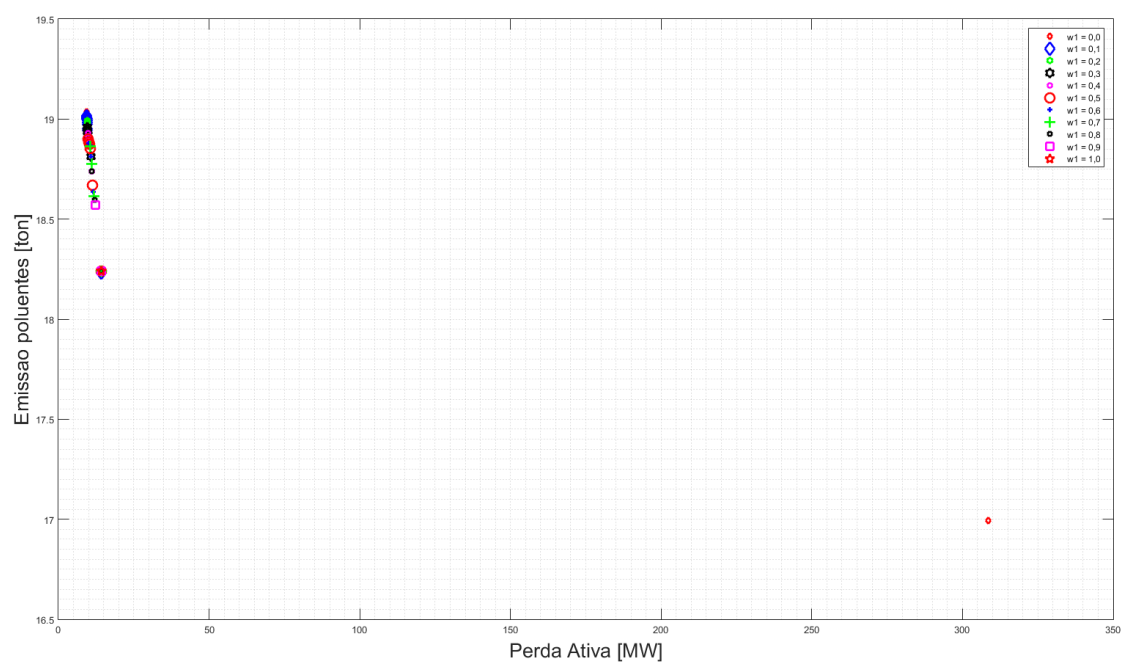
Tabela 14 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$Termo$	$\$Hidro$	$\$Eolica$	$\$Foto$
0,00	0,00	1,00	5871446,68	0,00	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	5134774,28	0,00	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	5134974,34	0,00	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	5135195,84	0,00	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	5135141,31	0,00	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	5135108,68	0,00	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	5134791,62	0,00	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	5135222,85	0,00	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	5135245,34	0,00	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	5135166,95	0,00	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	5135224,24	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	4926954,32	0,00	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	5032463,80	0,00	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	5073949,40	0,00	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	5092519,03	0,00	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	5102377,11	0,00	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	5108714,92	0,00	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	5112831,25	0,00	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	5115920,99	0,00	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	5118191,05	0,00	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	5119751,42	0,00	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	4926969,71	0,00	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	4986042,59	0,00	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	5032598,37	0,00	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	5058174,65	0,00	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	5073976,02	0,00	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	5084868,85	0,00	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	5092558,59	0,00	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	5098399,60	0,00	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	5102423,63	0,00	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	4926968,83	0,00	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	4967294,61	0,00	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	5005153,01	0,00	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	5032595,68	0,00	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	5051127,58	0,00	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	5064298,35	0,00	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	5073994,71	0,00	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	5081667,10	0,00	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	4926962,36	0,00	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	4958699,61	0,00	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	4986062,24	0,00	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	5013117,69	0,00	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	5032612,26	0,00	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	5047114,50	0,00	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	5058197,49	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	4926970,10	0,00	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	4953821,72	0,00	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	4973714,68	0,00	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	4998093,58	0,00	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	5017509,85	0,00	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	5032604,20	0,00	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	4926952,27	0,00	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	4948036,15	0,00	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	4967335,97	0,00	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	4986072,16	0,00	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	5005190,81	0,00	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	4926952,46	0,00	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	4943218,54	0,00	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	4962349,31	0,00	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	4976908,28	0,00	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	4926966,67	0,00	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	4939392,13	0,00	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	4958737,84	0,00	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	4926953,05	0,00	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	4937334,19	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	4926946,54	0,00	0,00	0,00

Fonte: Próprio Autor

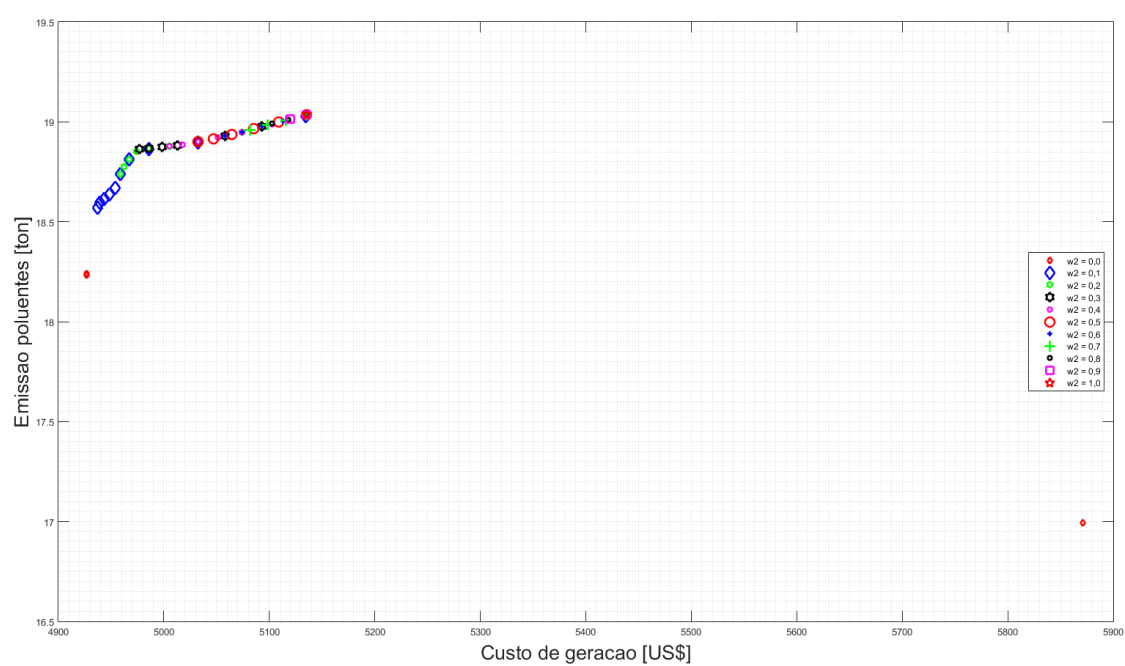


Figura 25 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1



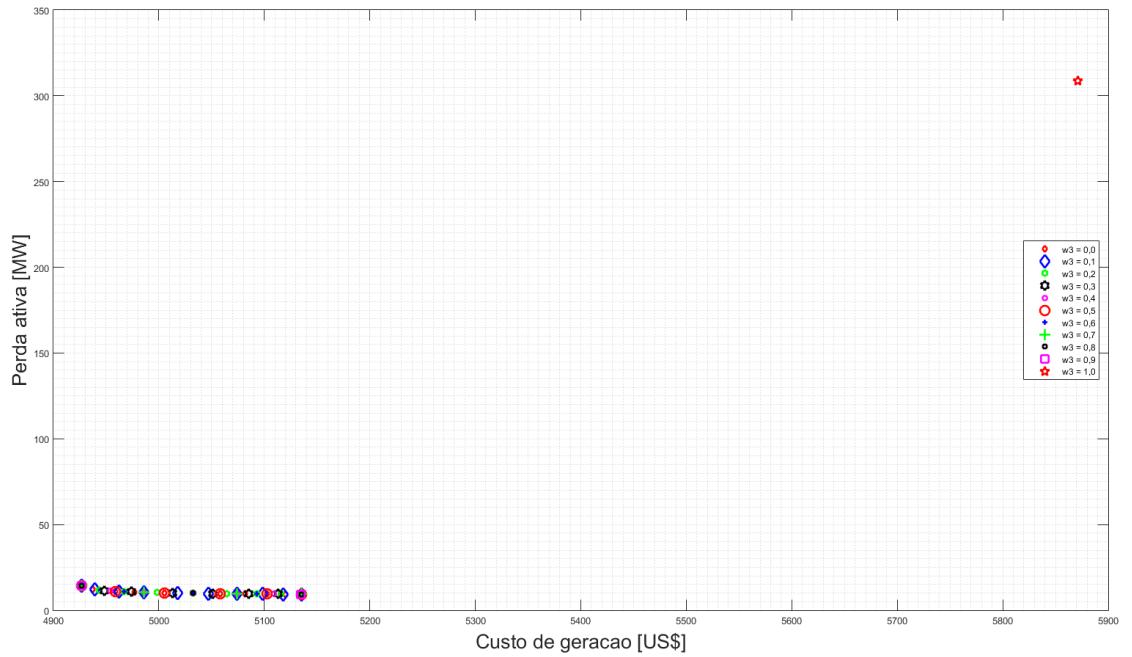
Fonte: Próprio Autor

Figura 26 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1



Fonte: Próprio Autor

Figura 27 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1



**Fonte:** Próprio Autor

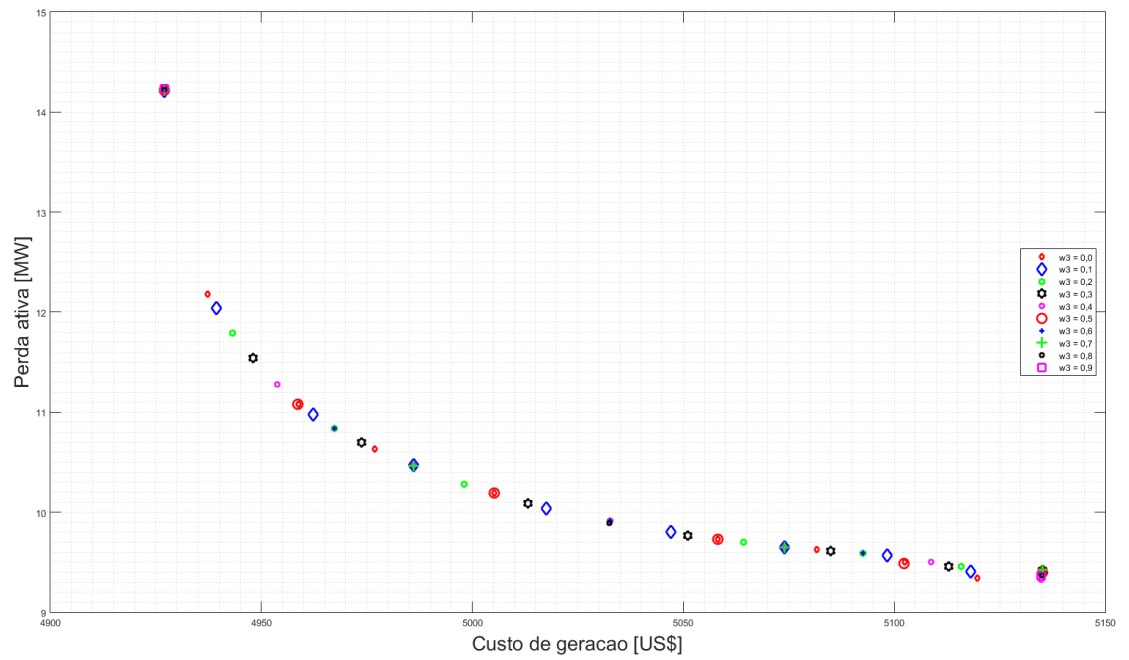
Na Tabela (13) verifica-se que o menor valor do custo total de geração para o sistema IEEE30 considerando apenas as gerações termoeletricas é obtido para a ponderação  $w_1 = 0,10$ ,  $w_2 = 0,10$  e  $w_3 = 0,80$ , no entanto, os valores de perda ativa e emissão de poluentes são elevados.

Seja o conjunto de soluções da Tabela (13), caso necessário, o operador do sistema pode selecionar soluções com valores de custo total de geração superiores, contudo, com valores de perda ativa e emissão de poluentes inferiores em relação à solução com menor custo total de geração.

Na Figura (25) apresenta-se um comportamento conflitante entre os valores de custo de geração de energia e a emissão de poluentes, e na Figura (26) verifica-se que os valores de custo de geração e emissão de poluentes apresentam um comportamento não conflitante.

Para a ponderação  $w_3 = 1,00$  na Figura (27) não é possível verificar corretamente o comportamento das outras componentes da função objetivo. Desta forma, na Figura (28) apresenta-se o comportamento da Figura (27) desconsiderando o parâmetro de  $w_3 = 1,00$ .

Figura 28 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso E1



Fonte: Próprio Autor

Na Figura (28) apresenta-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e perda ativa no sistema.

Tabela 15 – Sistema IEEE30 - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{Ger_{N_{Ren}}}$	$10^3 \$_{Ger_{Ren}}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>35658915,05</b>	<b>3360,31</b>	<b>4035,24</b>	<b>235,53</b>	<b>6,90</b>	<b>9,0528</b>	<b>4,02</b>
0,00	0,10	0,90	8649986,31	3960,12	3558,04	9,43	-2,11	9,8542	9,64
0,00	0,20	0,80	8648359,69	3959,98	3558,13	9,42	-2,11	9,8551	11,48
0,00	0,30	0,70	8643787,42	3959,08	3558,56	9,38	-2,10	9,8554	9,17
0,00	0,40	0,60	8638471,07	3958,77	3558,67	9,34	-2,10	9,8556	10,13
0,00	0,50	0,50	8639111,11	3958,77	3558,67	9,35	-2,10	9,8557	11,66
0,00	0,60	0,40	8648410,23	3959,96	3558,15	9,42	-2,11	9,8557	10,88
0,00	0,70	0,30	8638232,59	3958,87	3558,63	9,34	-2,10	9,8558	11,09
0,00	0,80	0,20	8648876,76	3960,06	3558,10	9,42	-2,11	9,8557	10,94
0,00	0,90	0,10	8637765,67	3958,72	3558,70	9,34	-2,10	9,8559	10,75
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>8649210,87</b>	<b>3959,93</b>	<b>3558,17</b>	<b>9,43</b>	<b>-2,11</b>	<b>9,8558</b>	<b>8,14</b>
0,10	0,00	0,90	12177584,58	438,00	5309,27	53,59	-0,17	12,8318	20,80
0,10	0,10	0,80	8239980,63	2827,81	3966,12	12,05	-2,64	9,9159	12,36
0,10	0,20	0,70	8313058,03	3242,71	3800,91	10,58	-2,54	9,8530	13,14
0,10	0,30	0,60	8412206,37	3503,78	3710,72	9,98	-2,39	9,8208	12,28
0,10	0,40	0,50	8459959,53	3630,73	3667,65	9,68	-2,29	9,8240	12,55
0,10	0,50	0,40	8495909,31	3706,21	3642,18	9,56	-2,25	9,8282	11,31
0,10	0,60	0,30	8523870,77	3755,79	3625,48	9,52	-2,22	9,8325	11,94
0,10	0,70	0,20	8545327,38	3790,39	3613,88	9,51	-2,20	9,8364	11,95
0,10	0,80	0,10	8557162,38	3814,72	3605,82	9,47	-2,19	9,8398	11,22
0,10	0,90	0,00	8558916,06	3832,34	3600,09	9,39	-2,16	9,8426	10,81
0,20	0,00	0,80	12177978,69	438,00	5309,27	53,59	-0,17	12,8318	21,55
0,20	0,10	0,70	8386112,72	2246,30	4223,53	15,97	-2,56	10,1685	11,42
0,20	0,20	0,60	8239888,57	2827,58	3966,25	12,05	-2,64	9,9171	11,81
0,20	0,30	0,50	8262737,31	3058,23	3869,20	11,13	-2,60	9,8936	11,98
0,20	0,40	0,40	8312968,10	3242,54	3800,98	10,58	-2,54	9,8537	10,53
0,20	0,50	0,30	8369109,94	3400,06	3746,41	10,19	-2,46	9,8279	10,97
0,20	0,60	0,20	8412071,25	3503,77	3710,73	9,98	-2,39	9,8212	13,11
0,20	0,70	0,10	8438536,66	3576,22	3686,12	9,80	-2,33	9,8220	11,63
0,20	0,80	0,00	8462416,74	3631,17	3667,45	9,70	-2,30	9,8241	11,64
0,30	0,00	0,70	12178195,97	438,00	5309,28	53,59	-0,17	12,8318	17,86
0,30	0,10	0,60	8710237,52	1826,77	4423,67	20,50	-2,36	10,5075	11,28
0,30	0,20	0,50	8285856,80	2495,32	4109,06	14,01	-2,63	10,0477	13,67
0,30	0,30	0,40	8239884,53	2827,51	3966,29	12,05	-2,64	9,9175	10,81
0,30	0,40	0,30	8251781,36	2997,79	3894,05	11,33	-2,62	9,8975	11,83
0,30	0,50	0,20	8274189,85	3110,82	3848,31	10,96	-2,59	9,8888	11,11
0,30	0,60	0,10	8312884,52	3242,48	3801,01	10,58	-2,54	9,8539	13,16
0,30	0,70	0,00	8346735,92	3354,15	3762,41	10,25	-2,47	9,8339	13,88
0,40	0,00	0,60	12178292,41	438,00	5309,28	53,59	-0,17	12,8318	19,81
0,40	0,10	0,50	9126543,91	1492,07	4589,96	25,37	-2,11	10,9031	12,36
0,40	0,20	0,40	8385992,57	2245,96	4223,73	15,97	-2,56	10,1697	12,42
0,40	0,30	0,30	8261519,89	2599,68	4063,66	13,32	-2,64	9,9984	11,77
<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,20</b>	<b>8239878,22</b>	<b>2827,47</b>	<b>3966,31</b>	<b>12,05</b>	<b>-2,64</b>	<b>9,9177</b>	<b>11,72</b>
0,40	0,50	0,10	8247311,08	2962,02	3908,89	11,47	-2,62	9,9002	12,16
0,40	0,60	0,00	8262729,70	3058,18	3869,24	11,13	-2,60	9,8940	13,28
0,50	0,00	0,50	12177623,40	438,00	5309,27	53,59	-0,17	12,8318	20,80
0,50	0,10	0,40	9394916,54	1330,36	4672,52	28,27	-1,98	11,1098	12,81
0,50	0,20	0,30	8530814,99	2025,63	4327,73	18,15	-2,47	10,3273	11,02
0,50	0,30	0,20	8313643,41	2408,09	4148,79	14,64	-2,61	10,0848	12,58
0,50	0,40	0,10	8252446,09	2654,48	4040,06	12,98	-2,64	9,9755	12,56
0,50	0,50	0,00	8240070,86	2827,47	3966,31	12,05	-2,64	9,9178	13,09
0,60	0,00	0,40	12178201,04	438,00	5309,28	53,59	-0,17	12,8318	20,09
0,60	0,10	0,30	9538550,07	1250,70	4720,06	29,73	-1,87	11,2032	10,89
0,60	0,20	0,20	8710406,80	1826,33	4423,91	20,50	-2,36	10,5087	13,34
0,60	0,30	0,10	8386263,88	2245,86	4223,78	15,97	-2,56	10,1700	12,02
0,60	0,40	0,00	8285219,54	2495,23	4109,13	14,01	-2,63	10,0482	11,23
0,70	0,00	0,30	12177957,12	438,00	5309,27	53,59	-0,17	12,8318	18,73
0,70	0,10	0,20	9696439,34	1166,65	4775,39	31,29	-1,78	11,3187	11,38
0,70	0,20	0,10	8912826,53	1648,63	4511,47	22,94	-2,24	10,7056	13,19
0,70	0,30	0,00	8478285,04	2096,67	4293,93	17,40	-2,50	10,2717	12,09
0,80	0,00	0,20	12177742,04	438,00	5309,27	53,59	-0,17	12,8318	19,88
0,80	0,10	0,10	9849541,39	1094,64	4823,85	32,76	-1,70	11,4224	12,92
0,80	0,20	0,00	9126824,33	1491,62	4590,21	25,37	-2,11	10,9043	10,30
0,90	0,00	0,10	12178212,95	438,00	5309,28	53,59	-0,17	12,8318	21,08
0,90	0,10	0,00	10010538,26	1025,55	4871,45	34,28	-1,61	11,5298	13,48
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>12177569,87</b>	<b>438,00</b>	<b>5309,27</b>	<b>53,59</b>	<b>-0,17</b>	<b>12,8318</b>	<b>20,70</b>

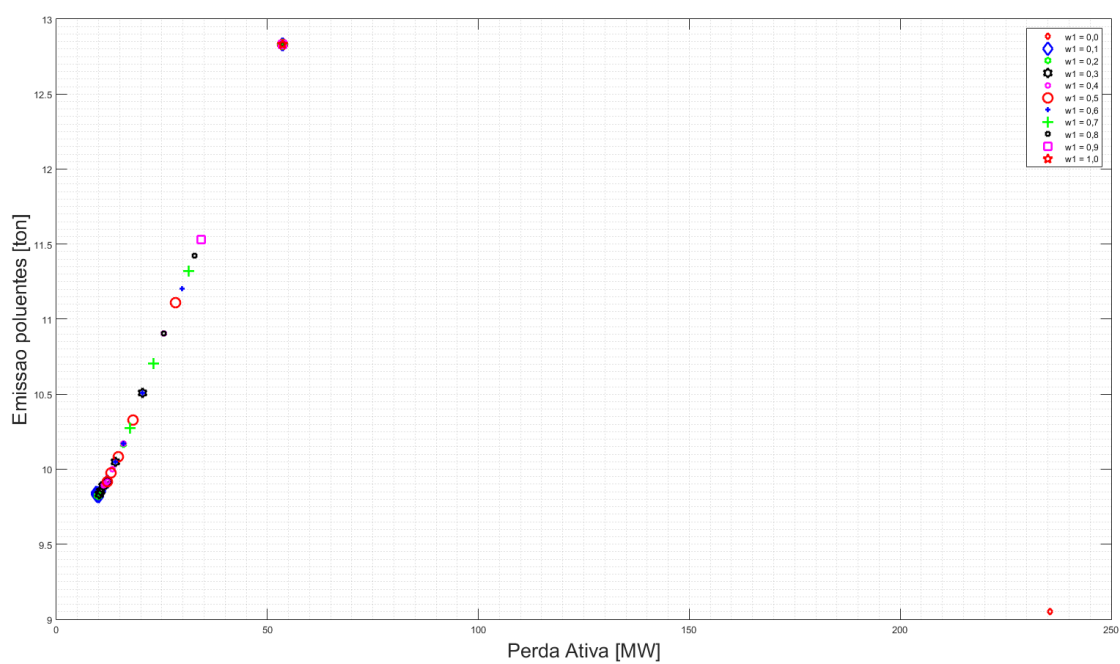
Fonte: Próprio Autor

Tabela 16 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	3360313,73	4035236,08	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	3960117,56	3558040,63	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	3959978,43	3558129,14	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	3959079,50	3558556,38	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	3958771,34	3558669,02	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	3958767,51	3558671,01	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	3959963,06	3558150,45	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	3958866,19	3558632,18	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	3960058,98	3558104,93	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	3958719,28	3558698,68	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	3959926,13	3558174,47	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	438000,32	5309269,78	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	2827809,36	3966115,26	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	3242707,49	3800905,08	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	3503780,53	3710716,40	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	3630726,30	3667648,13	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	3706213,95	3642177,92	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	3755787,17	3625478,42	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	3790386,58	3613884,14	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	3814723,14	3605816,95	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	3832335,72	3600092,10	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	438000,17	5309273,92	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	2246298,40	4223531,15	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	2827582,79	3966245,78	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	3058225,07	3869202,82	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	3242542,07	3800976,85	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	3400064,53	3746405,11	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	3503774,07	3710732,77	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	3576218,29	3686120,17	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	3631169,74	3667451,06	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	438000,10	5309276,19	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	1826765,74	4423673,32	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	2495323,13	4109058,05	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	2827507,96	3966287,55	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	2997788,72	3894045,70	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	3110824,25	3848313,40	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	3242475,72	3801007,40	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	3354153,84	3762405,08	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	438000,06	5309277,20	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	1492065,28	4589958,29	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	2245962,10	4223725,38	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	2599677,23	4063656,97	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	2827470,10	3966309,32	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	2962020,56	3908886,40	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	3058181,33	3869237,12	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	438000,30	5309270,18	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	1330356,50	4672522,14	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	2025625,45	4327734,24	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	2408088,19	4148794,98	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	2654479,16	4040062,42	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	2827467,51	3966311,31	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	438000,10	5309276,24	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	1250704,45	4720064,32	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	1826334,12	4423913,27	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	2245856,80	4223783,82	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	2495228,84	4109132,60	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	438000,18	5309273,69	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	1166653,50	4775389,79	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	1648631,02	4511468,87	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	2096671,35	4293930,93	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	438000,26	5309271,43	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	1094635,16	4823846,72	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	1491622,06	4590206,26	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	438000,09	5309276,37	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	1025549,37	4871453,44	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	438000,32	5309269,62	0,00	0,00

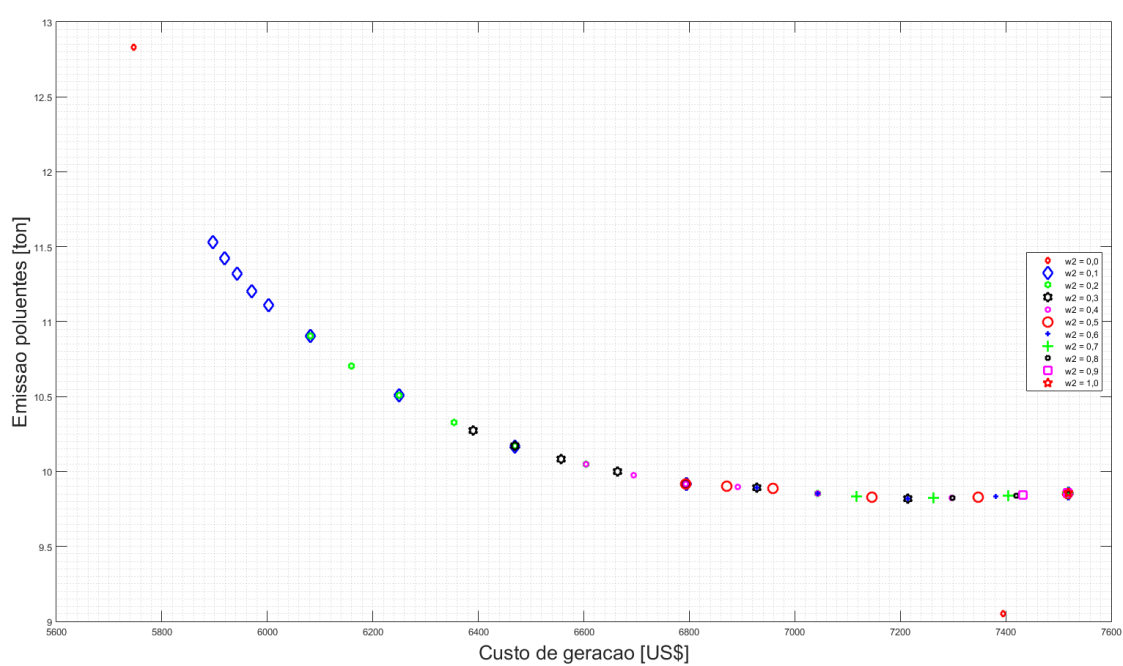
Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2



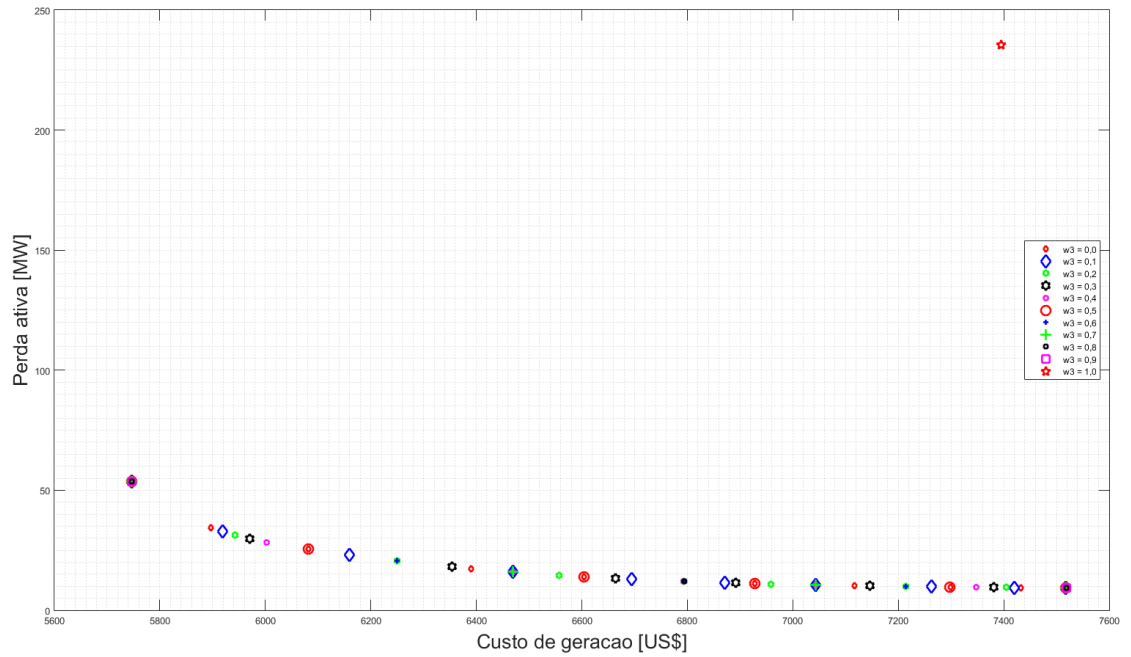
Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2



Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (15) verifica-se que o menor valor do custo total de geração de energia para o sistema IEEE30 considerando as gerações termoelétrica e hidroelétrica é obtida para as ponderações  $w_1 = 0,40$ ,  $w_2 = 0,40$  e  $w_3 = 0,20$ , e apresenta valores de perda ativa e emissão de poluentes elevados.

Comparando os resultados das Tabelas (15) e Tabela (13) verifica-se a redução na emissão de poluentes e elevação do valor de custo total de geração de energia. Analisando as Tabelas (16) e (14) observa-se uma diminuição do custo de geração das gerações termoelétrica ao introduzir as gerações hidroelétrica, já que estas possuem menores custos de geração.

O conjunto de soluções da Tabela (15), caso necessário, permite que o operador possa escolher soluções alternativas com valores de custo de geração de energia maiores, mas com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores.

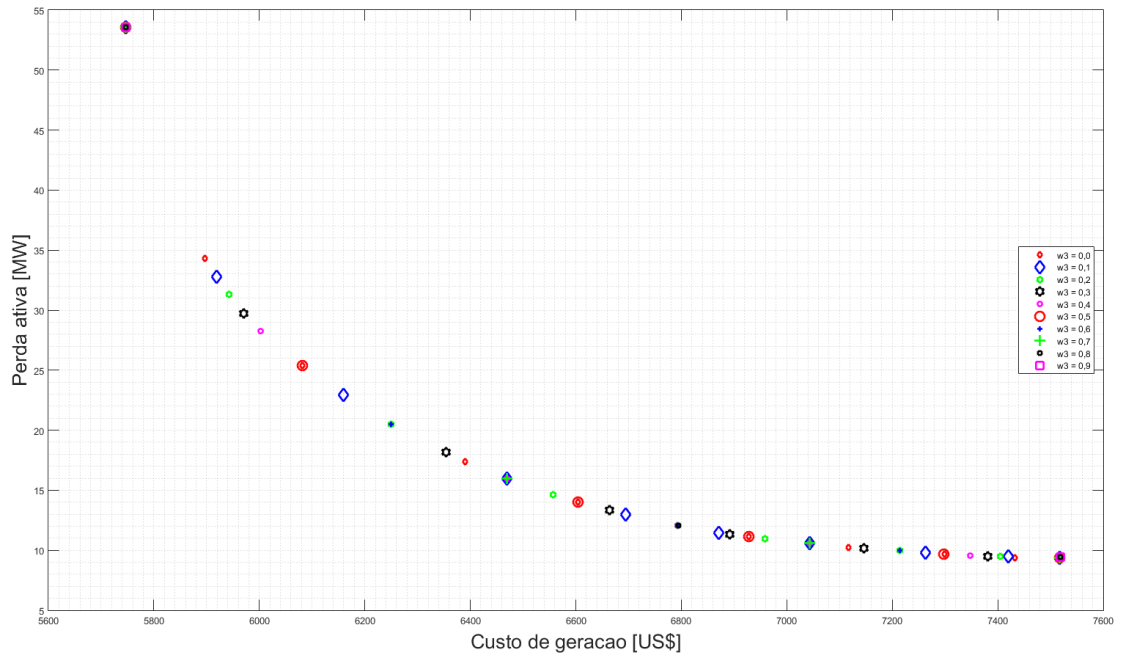
A Figura (29) apresenta um comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluente em função da variação do fator de ponderação do termo da função objetivo relativo ao custo de geração  $w_1$ .

A Figura (30) mostra o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e emissão de poluentes.

Para o fator de ponderação  $w_3 = 1,00$  da Figura (31) não é possível determinar o

comportamento das FOs referentes ao custo de geração e das perdas ativas. Desta forma, na Figura (32) apresentam-se os resultados das simulações sem considerar o fator  $w_3 = 1,00$ .

Figura 32 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso E2



**Fonte:** Próprio Autor

Na Figura (32) verifica-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e perda ativa no sistema.



Tabela 17 – Sistema IEEE30 - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{GerN.Ren}$	$10^3 \$_{GerRen}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>25836409,82</b>	<b>2158,42</b>	<b>3805,72</b>	<b>165,60</b>	<b>4,21</b>	<b>3,4836</b>	<b>3,36</b>
0,00	0,10	0,90	7890067,64	2684,02	3264,59	16,18	-1,77	3,7970	11,02
0,00	0,20	0,80	7890830,57	2684,71	3264,36	16,18	-1,77	3,7980	11,56
0,00	0,30	0,70	7896738,93	2685,30	3264,09	16,23	-1,77	3,7984	12,34
0,00	0,40	0,60	7890742,81	2685,03	3264,26	16,18	-1,77	3,7984	12,08
0,00	0,50	0,50	7890589,09	2685,07	3264,26	16,18	-1,77	3,7985	13,06
0,00	0,60	0,40	7891010,03	2685,15	3264,22	16,18	-1,77	3,7986	12,28
0,00	0,70	0,30	7890720,68	2685,18	3264,21	16,18	-1,77	3,7986	13,19
0,00	0,80	0,20	7890728,70	2685,22	3264,20	16,18	-1,77	3,7987	11,39
0,00	0,90	0,10	7892169,64	2685,29	3264,16	16,19	-1,77	3,7987	13,19
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>7890575,38</b>	<b>2685,21</b>	<b>3264,20</b>	<b>16,18</b>	<b>-1,77</b>	<b>3,7987</b>	<b>12,69</b>
0,10	0,00	0,90	9629264,84	286,34	4560,12	39,86	-1,27	5,9497	24,98
0,10	0,10	0,80	7541886,08	1724,99	3633,44	18,20	-1,86	3,8043	14,53
0,10	0,20	0,70	7588647,13	2044,20	3498,06	17,05	-1,84	3,6731	14,64
0,10	0,30	0,60	7647043,10	2222,76	3430,55	16,61	-1,80	3,6621	12,98
0,10	0,40	0,50	7683940,61	2326,67	3392,59	16,37	-1,78	3,6713	14,19
0,10	0,50	0,40	7709394,76	2390,40	3369,21	16,25	-1,77	3,6832	11,02
0,10	0,60	0,30	7697204,51	2432,70	3353,84	15,92	-1,74	3,6935	14,94
0,10	0,70	0,20	7709199,86	2465,06	3342,10	15,85	-1,73	3,7031	11,81
0,10	0,80	0,10	7638382,00	2486,48	3334,51	15,14	-1,66	3,7095	12,03
0,10	0,90	0,00	7580410,87	2504,25	3328,14	14,57	-1,62	3,7156	10,31
0,20	0,00	0,80	9630337,32	286,27	4560,19	39,87	-1,27	5,9499	26,48
0,20	0,10	0,70	7607169,77	1395,71	3807,09	20,04	-1,90	4,0759	14,70
0,20	0,20	0,60	7540668,59	1724,63	3633,65	18,19	-1,86	3,8048	13,89
0,20	0,30	0,50	7559689,89	1913,37	3551,34	17,46	-1,85	3,7110	13,94
0,20	0,40	0,40	7590079,93	2044,07	3498,10	17,07	-1,84	3,6734	12,91
0,20	0,50	0,30	7622104,74	2144,81	3459,37	16,82	-1,82	3,6625	12,02
0,20	0,60	0,20	7646255,72	2222,77	3430,56	16,61	-1,80	3,6623	13,91
0,20	0,70	0,10	7670192,92	2281,86	3408,98	16,49	-1,79	3,6661	12,97
0,20	0,80	0,00	7685463,55	2326,72	3392,58	16,38	-1,78	3,6714	13,48
0,30	0,00	0,70	9630772,32	286,25	4560,21	39,87	-1,27	5,9500	25,30
0,30	0,10	0,60	7722995,38	1189,34	3933,55	21,67	-1,95	4,2987	13,66
0,30	0,20	0,50	7561306,71	1533,06	3729,28	19,16	-1,87	3,9482	12,67
0,30	0,30	0,40	7538692,71	1724,49	3633,75	18,17	-1,86	3,8049	13,56
0,30	0,40	0,30	7551320,30	1859,41	3574,16	17,65	-1,86	3,7338	14,19
0,30	0,50	0,20	7569072,12	1961,61	3531,37	17,30	-1,85	3,6943	13,70
0,30	0,60	0,10	7588251,09	2044,07	3498,14	17,05	-1,84	3,6734	12,09
0,30	0,70	0,00	7612055,37	2113,76	3471,08	16,89	-1,83	3,6644	13,56
0,40	0,00	0,60	9630665,40	286,24	4560,22	39,87	-1,27	5,9501	25,78
0,40	0,10	0,50	7868775,50	1026,73	4037,55	23,37	-1,97	4,4903	14,63
0,40	0,20	0,40	7606683,85	1395,33	3807,34	20,03	-1,90	4,0766	14,31
0,40	0,30	0,30	7552392,95	1586,64	3700,53	18,88	-1,87	3,9031	15,77
0,40	0,40	0,20	7538766,74	1724,44	3633,78	18,17	-1,86	3,8050	12,91
0,40	0,50	0,10	7545257,56	1829,93	3586,88	17,74	-1,85	3,7477	13,03
0,40	0,60	0,00	7557601,66	1913,32	3551,41	17,44	-1,85	3,7111	12,58
0,50	0,00	0,50	9630548,44	286,23	4560,23	39,87	-1,27	5,9501	26,22
0,50	0,10	0,40	8028030,27	893,61	4124,75	25,08	-1,96	4,6710	14,03
0,50	0,20	0,30	7661761,79	1283,57	3874,47	20,86	-1,93	4,1955	12,88
0,50	0,30	0,20	7575211,67	1484,33	3756,44	19,45	-1,88	3,9920	14,38
0,50	0,40	0,10	7547831,29	1616,83	3685,07	18,72	-1,87	3,8794	14,48
<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>7538440,39</b>	<b>1724,41</b>	<b>3633,80</b>	<b>18,17</b>	<b>-1,86</b>	<b>3,8051</b>	<b>11,86</b>
0,60	0,00	0,40	9630661,16	286,22	4560,23	39,87	-1,27	5,9501	24,25
0,60	0,10	0,30	8188367,75	785,72	4197,07	26,71	-1,93	4,8388	14,19
0,60	0,20	0,20	7722755,95	1188,99	3933,79	21,67	-1,95	4,2994	14,72
0,60	0,30	0,10	7607189,49	1395,21	3807,42	20,04	-1,90	4,0768	13,59
0,60	0,40	0,00	7562968,07	1532,94	3729,36	19,17	-1,87	3,9486	14,78
0,70	0,00	0,30	9630062,30	286,22	4560,23	39,86	-1,27	5,9501	25,09
0,70	0,10	0,20	8341845,91	696,79	4257,92	28,23	-1,89	4,9931	13,17
0,70	0,20	0,10	7792334,18	1103,60	3988,14	22,51	-1,97	4,3974	14,13
0,70	0,30	0,00	7642237,20	1318,06	3853,31	20,59	-1,92	4,1580	13,56
0,80	0,00	0,20	9630817,07	286,22	4560,24	39,87	-1,27	5,9501	24,73
0,80	0,10	0,10	8488017,52	622,57	4309,67	29,63	-1,85	5,1342	13,83
0,80	0,20	0,00	7869028,00	1026,41	4037,78	23,37	-1,97	4,4910	14,33
0,90	0,00	0,10	9630770,15	286,22	4560,24	39,87	-1,27	5,9501	24,41
0,90	0,10	0,00	8621891,64	560,72	4353,48	30,90	-1,80	5,2610	12,70
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>9630610,08</b>	<b>286,21</b>	<b>4560,24</b>	<b>39,87</b>	<b>-1,27</b>	<b>5,9501</b>	<b>25,98</b>

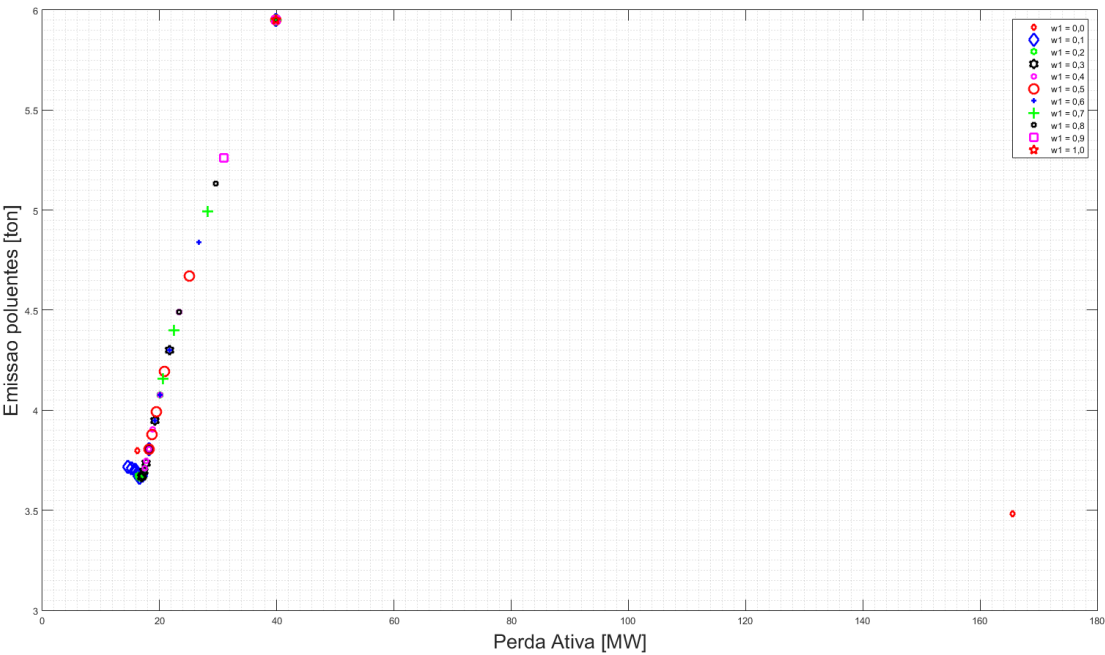
Fonte: Próprio Autor

Tabela 18 – Sistema IEEE30 - Custos individuais de geração - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	2158420,28	3027163,89	290331,94	488220,91
0,00	0,10	0,90	2684022,08	2471180,32	307382,36	486027,60
0,00	0,20	0,80	2684712,24	2470949,30	307381,59	486028,25
0,00	0,30	0,70	2685297,68	2470665,51	307382,45	486042,61
0,00	0,40	0,60	2685025,94	2470856,51	307381,80	486025,91
0,00	0,50	0,50	2685069,32	2470847,78	307381,37	486025,89
0,00	0,60	0,40	2685148,68	2470815,55	307381,16	486027,61
0,00	0,70	0,30	2685180,93	2470803,96	307380,54	486027,07
0,00	0,80	0,20	2685215,32	2470788,79	307380,81	486027,02
0,00	0,90	0,10	2685289,74	2470749,97	307381,57	486029,53
0,00	1,00	0,00	2685208,47	2470795,37	307381,46	486026,36
0,10	0,00	0,90	286335,54	3740886,92	309136,11	510096,25
0,10	0,10	0,80	1724991,65	2821259,98	308126,97	504049,91
0,10	0,20	0,70	2044196,65	2694475,35	307866,84	495720,91
0,10	0,30	0,60	2222763,20	2630497,15	307742,30	492308,64
0,10	0,40	0,50	2326665,64	2594468,89	307666,40	490454,56
0,10	0,50	0,40	2390403,18	2572060,66	307618,18	489533,57
0,10	0,60	0,30	2432703,20	2557342,86	307578,49	488916,63
0,10	0,70	0,20	2465059,49	2546049,93	307550,46	488496,38
0,10	0,80	0,10	2486476,37	2538921,38	307516,43	488071,50
0,10	0,90	0,00	2504249,35	2532921,09	307478,46	487740,54
0,20	0,00	0,80	286270,85	3740958,35	309134,99	510096,25
0,20	0,10	0,70	1395708,72	2989943,07	308452,32	508695,62
0,20	0,20	0,60	1724631,96	2821474,12	308127,02	504052,32
0,20	0,30	0,50	1913367,51	2744756,88	307967,53	498618,86
0,20	0,40	0,40	2044069,26	2694502,21	307866,98	495731,74
0,20	0,50	0,30	2144810,60	2657759,89	307796,31	493811,45
0,20	0,60	0,20	2222765,73	2630508,25	307741,99	492308,61
0,20	0,70	0,10	2281860,82	2610064,22	307700,69	491210,84
0,20	0,80	0,00	2326715,10	2594450,92	307667,25	490457,63
0,30	0,00	0,70	286249,95	3740982,57	309134,62	510096,25
0,30	0,10	0,60	1189342,96	3116233,86	308659,30	508656,77
0,30	0,20	0,50	1533060,28	2912879,76	308310,13	508094,57
0,30	0,30	0,40	1724490,98	2821575,41	308126,94	504047,10
0,30	0,40	0,30	1859409,66	2766047,98	308011,91	500104,31
0,30	0,50	0,20	1961610,64	2725987,64	307929,32	497453,41
0,30	0,60	0,10	2044068,87	2694554,59	307866,91	495721,34
0,30	0,70	0,00	2113761,80	2668861,89	307817,65	494402,37
0,40	0,00	0,60	286236,97	3740992,83	309134,47	510096,25
0,40	0,10	0,50	1026730,97	3220009,86	308797,02	508746,42
0,40	0,20	0,40	1395326,47	2990192,36	308452,40	508695,03
0,40	0,30	0,30	1586643,14	2885029,46	308254,46	507241,64
0,40	0,40	0,20	1724436,12	2821604,69	308126,96	504048,62
0,40	0,50	0,10	1829928,61	2777861,08	308036,40	500983,43
0,40	0,60	0,00	1913317,50	2744832,27	307967,29	498609,60
0,50	0,00	0,50	286228,84	3740998,63	309134,40	510096,25
0,50	0,10	0,40	893607,79	3306942,68	308892,31	508914,84
0,50	0,20	0,30	1283569,45	3057217,72	308566,49	508681,94
0,50	0,30	0,20	1484331,36	2939576,60	308361,43	508501,52
0,50	0,40	0,10	1616832,67	2870212,61	308224,60	506634,70
0,50	0,50	0,00	1724408,00	2821619,80	308126,82	504048,97
0,60	0,00	0,40	286224,80	3741003,64	309134,33	510096,25
0,60	0,10	0,30	785715,59	3379022,71	308961,43	509088,92
0,60	0,20	0,20	1188991,01	3116475,74	308659,35	508656,58
0,60	0,30	0,10	1395212,39	2990268,18	308452,46	508695,25
0,60	0,40	0,00	1532938,78	2912950,77	308310,26	508101,65
0,70	0,00	0,30	286216,07	3741003,68	309134,37	510096,25
0,70	0,10	0,20	696793,39	3439675,84	309015,18	509229,09
0,70	0,20	0,10	1103595,12	3170719,17	308734,93	508680,97
0,70	0,30	0,00	1318064,85	3036083,33	308531,01	508692,88
0,80	0,00	0,20	286219,70	3741010,15	309134,23	510096,25
0,80	0,10	0,10	622567,90	3491272,63	309055,07	509341,61
0,80	0,20	0,00	1026407,16	3220241,09	308797,07	508746,39
0,90	0,00	0,10	286217,45	3741011,62	309134,19	510096,25
0,90	0,10	0,00	560723,13	3534958,17	309085,86	509431,61
1,00	0,00	0,00	286214,43	3741012,26	309134,20	510096,25

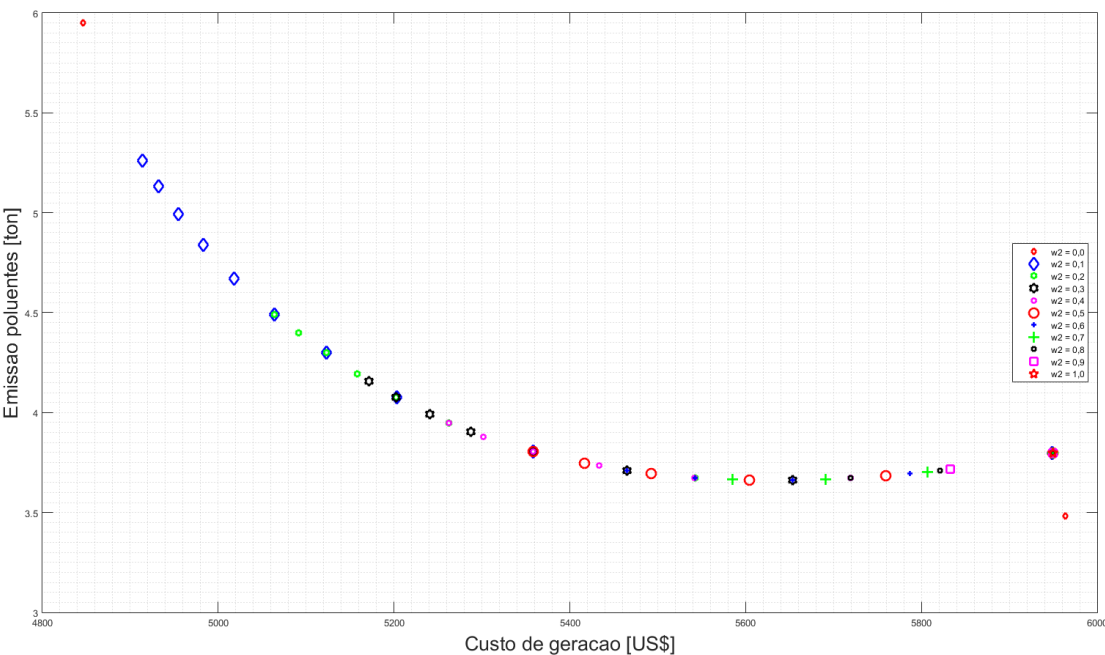
Fonte: Próprio Autor

Figura 33 – Sistema IEEE30 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3



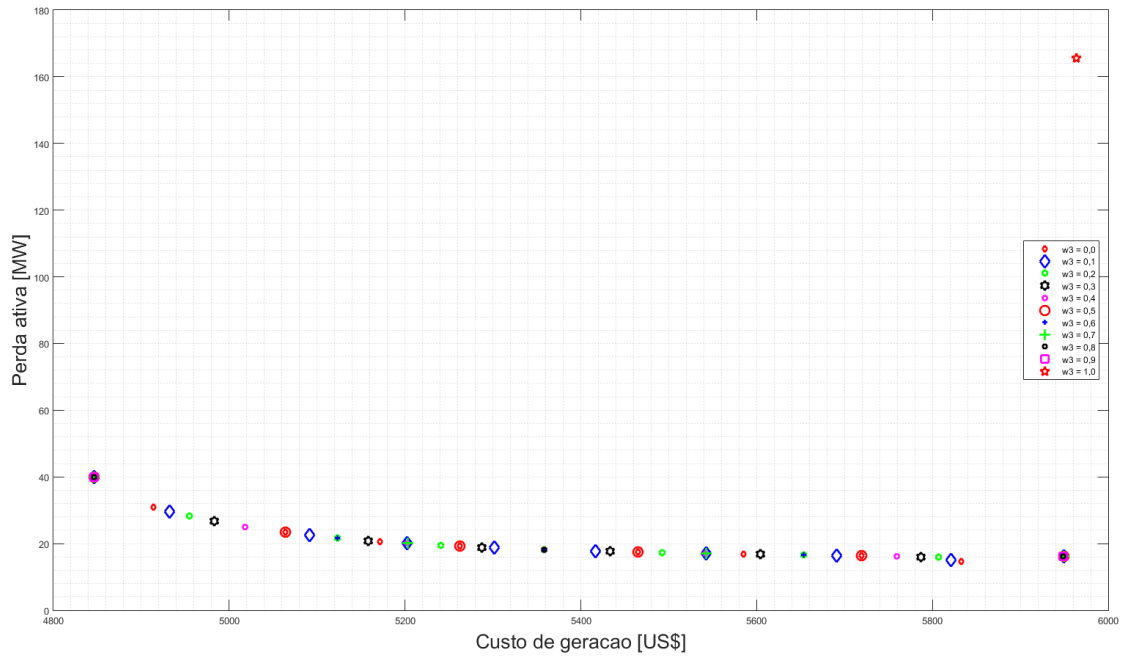
Fonte: Próprio Autor

Figura 34 – Sistema IEEE30 - Custo de geracao vs. Emissao de poluentes - Caso E3



Fonte: Próprio Autor

Figura 35 – Sistema IEEE30 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (15) verifica-se que o menor valor do custo total de geração para o sistema IEEE30 considerando todos os tipos de geradores de energia é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,50$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,00$ , porém, os valores de perda ativa e emissão de poluentes são relativamente elevados.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas (17) e (15) verifica-se a redução nos valores de emissão de poluentes e nos custos totais de geração e aumento dos valores de perda ativa. Esse aumento no valor de perda ativa ocorre porque as gerações eólica e fotovoltaica são gerações não despacháveis de menores custos e sofrem influência das variações climáticas (velocidade do vento e irradiação solar). Na Tabela (18) verifica-se a redução do custo de geração de energia das termoeletricas em relação aos casos anteriores, porque os custos de geração das gerações eólica e fotovoltaicas são economicamente mais vantajosas em relação as gerações térmica e hidroelétrica. Na Tabela (18) verifica-se a diminuição dos custos de geração de energia das gerações termoeletrica em relação às simulações da Tabela (16) devido aos menores custos das novas gerações renováveis no sistema elétrico.

Com base no conjunto de soluções da Tabela (17), caso necessário, o operador do sistema pode selecionar soluções com valor de custo total de geração superior, mas com valores de perda ativa e emissão de poluente inferiores.

Na Figura (33) ilustra-se o comportamento não conflitante entre os valores de perda

ativa e emissão de poluentes.

Nas Figuras (34) e (35) apresentam-se comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e emissão de poluentes e os valores de custo de geração de energia e perdas ativas do sistema, respectivamente.

## 5.6 MODELO ESTOCÁSTICO - SISTEMA IEEE118

O sistema IEEE118 é simulado adotando a faixa de  $[0,95, 1,05]$  [p.u] para a magnitude das tensões, tolerância angular de  $0,25$  [grau], e utilizando os dados estocásticos de blocos de tempos, níveis de demanda, velocidade de vento, irradiação solar e suas respectivas probabilidades apresentados na Tabela (41) do Anexo (A).

Nas Tabelas (19), (21) e (23) apresentam-se os custos totais de geração, custos de geração renovável, custos de geração não renovável, perdas ativas, perdas reativas e tempo computacional para os casos E1, E2 e E3, respectivamente.

Nas Figuras (36) - (38), (39) - (41) e (42) - (44) apresentam-se graficamente os resultados obtidos nas Tabelas (19), (21) e (23) fixando os pesos de uma das componentes da função objetivo.

Tabela 19 – Sistema IEEE118 - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{Ger_{N, Ren}}$	$10^3 \$_{Ger_{Ren}}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1208370518,01</b>	<b>1162319,43</b>	<b>0,00</b>	<b>383,76</b>	<b>-113,97</b>	<b>178,3023</b>	<b>130,72</b>
0,00	0,10	0,90	1143620378,12	1135141,78	0,00	70,65	-95,64	249,5787	149,20
0,00	0,20	0,80	1143030382,25	1135031,96	0,00	66,65	-94,93	250,5200	149,42
0,00	0,30	0,70	1142883416,32	1135029,86	0,00	65,45	-94,83	250,8758	153,94
0,00	0,40	0,60	1143206506,86	1135202,96	0,00	66,70	-94,81	251,0943	159,88
0,00	0,50	0,50	1143064193,38	1135161,77	0,00	65,85	-94,95	251,2213	146,05
0,00	0,60	0,40	1143145842,56	1135206,68	0,00	66,16	-95,03	251,3273	146,08
0,00	0,70	0,30	1143221766,62	1135253,05	0,00	66,41	-95,10	251,4179	176,83
0,00	0,80	0,20	1143021376,06	1135163,98	0,00	65,48	-95,19	251,4492	161,14
0,00	0,90	0,10	1142892888,90	1135113,00	0,00	64,83	-95,24	251,4828	166,97
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1142773431,55</b>	<b>1135064,95</b>	<b>0,00</b>	<b>64,24</b>	<b>-95,29</b>	<b>251,5080</b>	<b>147,22</b>
0,10	0,00	0,90	834967077,81	757899,71	0,00	642,23	-78,33	466,2581	149,72
0,10	0,10	0,80	826897648,13	759995,64	0,00	557,52	-72,32	486,3319	194,47
0,10	0,20	0,70	833519427,86	778549,62	0,00	458,08	-75,88	462,5258	183,69
0,10	0,30	0,60	852834811,52	811058,05	0,00	348,14	-80,48	421,2390	164,88
0,10	0,40	0,50	875231324,01	842585,96	0,00	272,04	-83,76	387,5890	166,30
0,10	0,50	0,40	894780819,66	867804,44	0,00	224,80	-85,83	365,1484	219,89
0,10	0,60	0,30	911320149,79	888065,81	0,00	193,79	-87,22	349,4486	165,52
0,10	0,70	0,20	925899210,24	905309,66	0,00	171,58	-88,26	336,4228	179,16
0,10	0,80	0,10	938912629,78	920352,72	0,00	154,67	-89,12	325,1264	178,78
0,10	0,90	0,00	950368545,50	933347,82	0,00	141,84	-89,78	315,9281	173,78
0,20	0,00	0,80	833980424,07	757725,40	0,00	635,46	-74,26	466,2640	172,63
0,20	0,10	0,70	827200534,92	758719,18	0,00	570,68	-71,04	479,1657	155,55
0,20	0,20	0,60	826536867,63	759868,82	0,00	555,57	-69,88	486,6655	172,36
0,20	0,30	0,50	827753276,17	765597,63	0,00	517,96	-71,33	481,5360	165,69
0,20	0,40	0,40	833203853,68	778291,50	0,00	457,60	-74,15	463,1866	159,44
0,20	0,50	0,30	842004740,72	794195,75	0,00	398,41	-76,93	441,9764	162,28
0,20	0,60	0,20	852558028,64	810819,38	0,00	347,82	-79,37	421,8092	173,30
0,20	0,70	0,10	863950390,61	827308,61	0,00	305,35	-81,32	403,4048	176,84
0,20	0,80	0,00	874971786,40	842378,53	0,00	271,61	-82,86	388,0553	165,31
0,30	0,00	0,70	833534825,47	757647,30	0,00	632,40	-72,14	466,2730	147,17
0,30	0,10	0,60	827732537,04	758282,63	0,00	578,75	-70,31	475,5689	163,80
0,30	0,20	0,50	826652122,17	759032,98	0,00	563,49	-69,27	482,2735	163,66
0,30	0,30	0,40	826402914,25	759823,31	0,00	554,83	-68,74	486,7897	166,45
0,30	0,40	0,30	826831534,86	762743,59	0,00	534,07	-69,51	485,3274	180,94
0,30	0,50	0,20	828957978,53	769093,37	0,00	498,87	-71,21	476,6679	173,02
0,30	0,60	0,10	833096579,07	778201,32	0,00	457,46	-73,27	463,4201	162,33
0,30	0,70	0,00	838736960,27	788721,15	0,00	416,80	-75,24	449,0842	181,09
0,40	0,00	0,60	833264027,39	757600,24	0,00	630,53	-70,94	466,2806	166,80
0,40	0,10	0,50	828233560,47	758039,58	0,00	584,95	-69,73	473,4645	165,95
0,40	0,20	0,40	826883945,52	758661,03	0,00	568,52	-69,01	479,2302	150,03
0,40	0,30	0,30	826460491,66	759174,47	0,00	560,72	-68,29	483,6820	172,69
0,40	0,40	0,20	826329476,79	759800,90	0,00	554,40	-67,94	486,8477	153,17
0,40	0,50	0,10	826543050,70	761657,17	0,00	540,72	-68,45	486,4950	164,39
0,40	0,60	0,00	827593565,06	765474,49	0,00	517,66	-69,56	481,8758	195,98
0,50	0,00	0,50	833078529,02	757568,12	0,00	629,25	-70,09	466,2849	179,58
0,50	0,10	0,40	828671558,82	757888,84	0,00	589,86	-69,26	472,0813	204,97
0,50	0,20	0,30	827161684,54	758410,35	0,00	572,93	-68,75	477,1431	172,38
0,50	0,30	0,20	826596186,86	758867,87	0,00	564,40	-68,15	481,1486	178,70
0,50	0,40	0,10	826380614,89	759259,83	0,00	559,34	-67,53	484,4895	191,80
<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>826297303,22</b>	<b>759788,78</b>	<b>0,00</b>	<b>554,24</b>	<b>-67,34</b>	<b>486,8839</b>	<b>179,47</b>
0,60	0,00	0,40	832951371,67	757546,05	0,00	628,38	-69,42	466,2880	170,98
0,60	0,10	0,30	829042887,38	757787,31	0,00	593,80	-68,87	471,0975	170,98
0,60	0,20	0,20	827445457,81	758229,85	0,00	576,80	-68,51	475,6045	173,30
0,60	0,30	0,10	826772149,11	758640,15	0,00	567,77	-67,98	479,2604	155,86
0,60	0,40	0,00	826461909,89	758998,01	0,00	562,20	-67,43	482,3359	164,67
0,70	0,00	0,30	832842991,59	757527,38	0,00	627,63	-68,93	466,2884	210,78
0,70	0,10	0,20	829349329,01	757717,25	0,00	596,93	-68,56	470,3828	173,66
0,70	0,20	0,10	827717134,55	758095,86	0,00	580,18	-68,28	474,4277	179,48
0,70	0,30	0,00	826962470,66	758464,48	0,00	570,82	-67,82	477,7888	183,20
0,80	0,00	0,20	832768134,53	757514,41	0,00	627,11	-68,50	466,2897	165,33
0,80	0,10	0,10	829615321,48	757665,50	0,00	599,58	-68,29	469,8238	167,70
0,80	0,20	0,00	827979935,81	757992,73	0,00	583,23	-68,06	473,4884	172,50
0,90	0,00	0,10	832709961,06	757504,29	0,00	626,71	-68,17	466,2911	174,88
0,90	0,10	0,00	829847139,75	757627,64	0,00	601,83	-68,04	469,3859	187,91
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>832654857,97</b>	<b>757494,69</b>	<b>0,00</b>	<b>626,33</b>	<b>-67,90</b>	<b>466,2909</b>	<b>172,84</b>

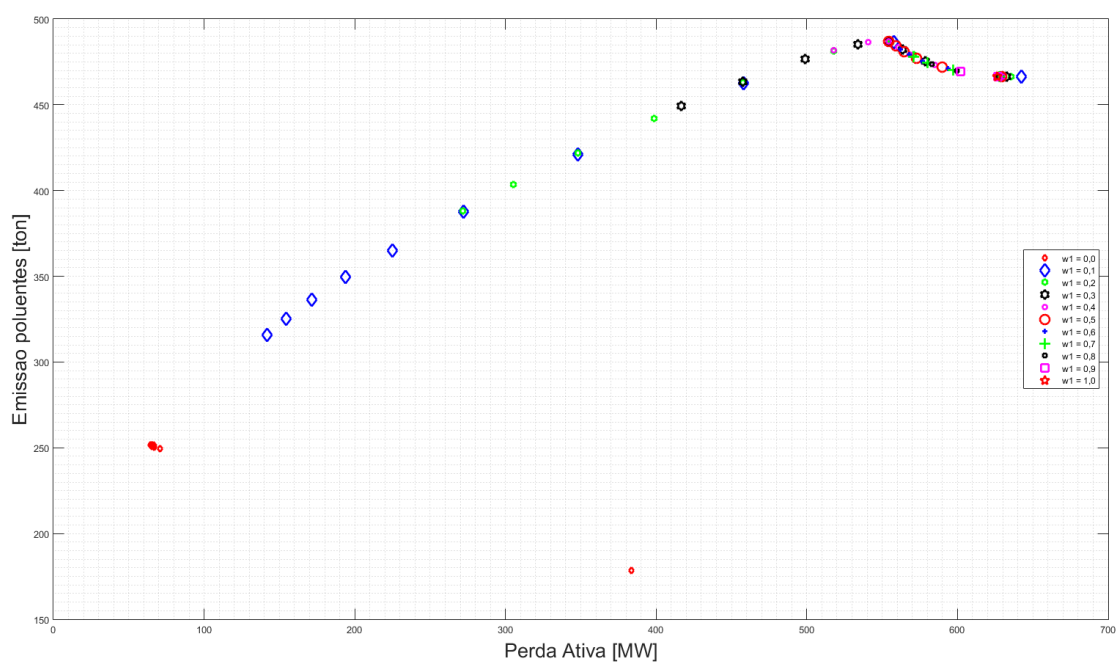
Fonte: Próprio Autor

Tabela 20 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	1162319434,05	0,00	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	1135141780,34	0,00	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	1135031956,13	0,00	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	1135029857,35	0,00	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	1135202960,31	0,00	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	1135161770,22	0,00	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	1135206684,78	0,00	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	1135253052,99	0,00	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	1135163975,34	0,00	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	1135112999,40	0,00	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	1135064946,67	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	757899707,60	0,00	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	759995639,02	0,00	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	778549624,81	0,00	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	811058050,99	0,00	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	842585960,12	0,00	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	867804438,60	0,00	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	888065808,67	0,00	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	905309661,92	0,00	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	920352718,89	0,00	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	933347822,28	0,00	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	757725395,87	0,00	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	758719183,95	0,00	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	759868819,23	0,00	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	765597634,65	0,00	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	778291500,72	0,00	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	794195747,61	0,00	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	810819375,96	0,00	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	827308613,72	0,00	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	842378532,43	0,00	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	757647296,63	0,00	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	758282626,23	0,00	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	759032981,60	0,00	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	759823311,33	0,00	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	762743585,51	0,00	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	769093370,13	0,00	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	778201321,47	0,00	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	788721150,50	0,00	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	757600236,49	0,00	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	758039583,16	0,00	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	758661032,02	0,00	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	759174474,45	0,00	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	759800901,96	0,00	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	761657171,73	0,00	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	765474491,59	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	757568122,47	0,00	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	757888842,20	0,00	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	758410354,13	0,00	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	758867865,32	0,00	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	759259833,95	0,00	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	759788781,75	0,00	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	757546049,45	0,00	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	757787307,19	0,00	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	758229849,01	0,00	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	758640145,40	0,00	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	758998014,04	0,00	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	757527384,31	0,00	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	757717246,77	0,00	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	758095862,25	0,00	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	758464476,33	0,00	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	757514406,73	0,00	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	757665503,40	0,00	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	757992734,12	0,00	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	757504293,28	0,00	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	757627640,27	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	757494691,50	0,00	0,00	0,00

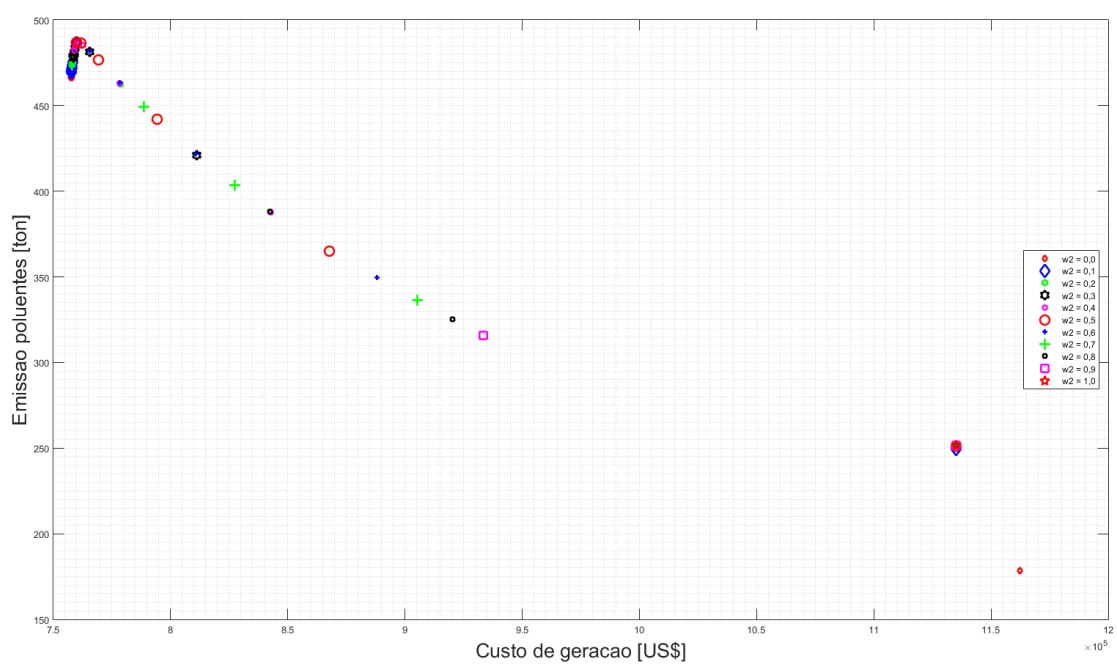
Fonte: Próprio Autor

Figura 36 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1



Fonte: Próprio Autor

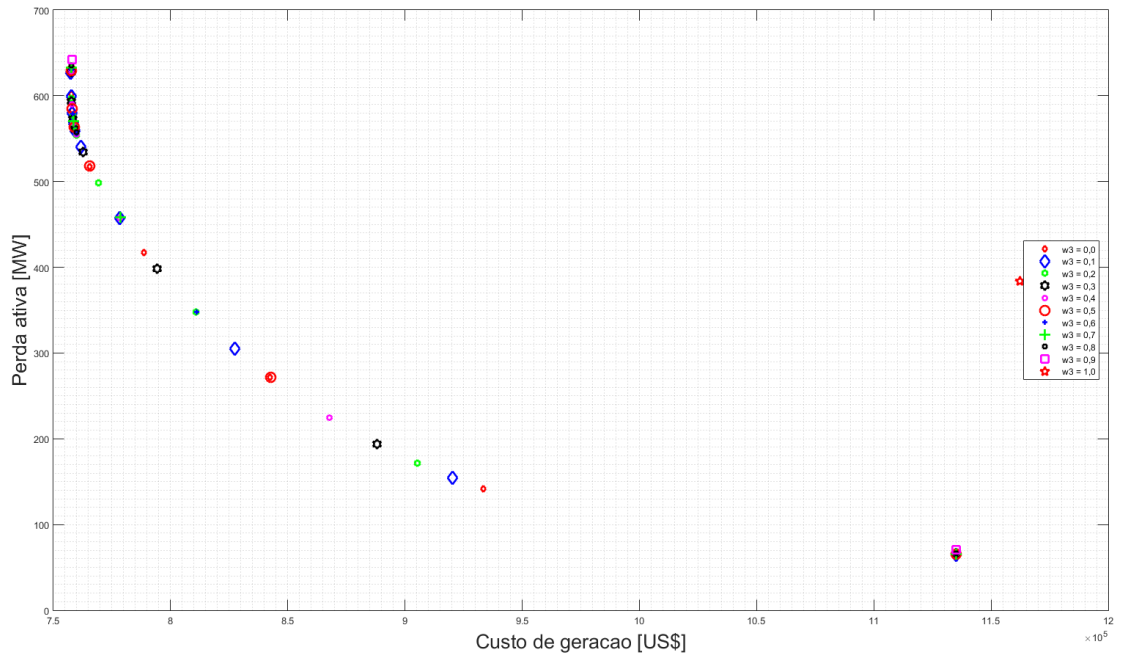
Figura 37 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1



Fonte: Próprio Autor



Figura 38 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (19) verifica-se que o menor valor de custo total de geração para o sistema IEEE118 considerando apenas as gerações termoelétricas é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,50$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,00$ , mas os valores de perda ativa e emissão de poluentes são relativamente elevados. Caso necessário, o operador do sistema pode selecionar soluções da Tabela (19) com valores de custo total de geração superiores, contudo, com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores em relação a solução com menor custo total de geração de energia.

Na Figura (36) ilustra-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes.

Nas Figuras (37) e (38) apresentam-se comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e emissão e os valores de custo de geração e perda ativa, respectivamente.

Tabela 21 – Sistema IEEE118 - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{GerN, Ren}$	$10^3 \$_{GerRen}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1031850931,10</b>	<b>702301,28</b>	<b>283494,49</b>	<b>383,79</b>	<b>-114,11</b>	<b>134,6061</b>	<b>88,48</b>
0,00	0,10	0,90	1041052056,38	837833,85	194732,48	70,71	-95,64	209,3598	152,36
0,00	0,20	0,80	1040542621,14	837572,09	194873,15	67,48	-94,88	210,3882	186,88
0,00	0,30	0,70	1040662029,50	837455,93	195038,42	68,06	-94,69	210,7375	189,25
0,00	0,40	0,60	1040357249,37	837303,15	195078,62	66,46	-94,82	211,0079	151,34
0,00	0,50	0,50	1040223102,98	837219,30	195113,25	65,75	-94,95	211,1575	159,19
0,00	0,60	0,40	1040243949,15	837146,62	195184,29	65,94	-95,05	211,2656	158,52
0,00	0,70	0,30	1040317992,74	837078,45	195267,17	66,44	-95,10	211,3517	144,30
0,00	0,80	0,20	1040101919,81	837071,06	195200,90	65,25	-95,20	211,4134	157,55
0,00	0,90	0,10	1040097162,25	837028,61	195235,69	65,27	-95,22	211,4649	167,03
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1040082562,34</b>	<b>836998,11</b>	<b>195257,81</b>	<b>65,22</b>	<b>-95,22</b>	<b>211,5110</b>	<b>165,86</b>
0,10	0,00	0,90	745344291,71	499828,60	157425,93	734,08	-73,68	262,7426	132,13
0,10	0,10	0,80	723517261,42	422893,52	244953,94	463,91	-78,32	254,2250	165,84
0,10	0,20	0,70	726113066,53	401912,68	274425,17	414,79	-79,26	256,3559	150,17
0,10	0,30	0,60	742000661,46	429386,90	273576,82	325,31	-82,20	260,8939	150,17
0,10	0,40	0,50	760557312,76	454979,31	274209,68	261,40	-84,61	258,5295	162,80
0,10	0,50	0,40	775646841,47	474213,91	274454,59	224,82	-86,36	257,2356	191,39
0,10	0,60	0,30	789471198,17	492717,70	272884,88	198,91	-87,59	256,2217	158,25
0,10	0,70	0,20	802244665,95	510405,69	270327,73	179,26	-88,50	254,7952	168,13
0,10	0,80	0,10	814742926,77	528083,49	267073,70	163,21	-89,25	251,6629	186,78
0,10	0,90	0,00	826938746,90	545354,07	263632,72	149,60	-89,84	247,3921	170,58
0,20	0,00	0,80	744361506,64	499975,91	157076,96	727,57	-69,27	262,8013	118,81
0,20	0,10	0,70	725838304,46	455946,82	206165,23	531,05	-74,42	257,5531	128,89
0,20	0,20	0,60	723181396,16	423180,60	244565,48	461,96	-76,39	254,3847	157,00
0,20	0,30	0,50	723704947,83	406425,84	264747,61	437,76	-77,36	254,0772	175,20
0,20	0,40	0,40	725897229,43	401998,42	274266,26	413,60	-78,56	256,5466	160,16
0,20	0,50	0,30	732529550,25	414209,28	274040,43	369,00	-80,34	260,6143	153,66
0,20	0,60	0,20	741835650,08	429319,38	273578,02	324,49	-82,07	261,1572	164,73
0,20	0,70	0,10	751676163,54	443319,71	273848,60	287,57	-83,53	259,8974	165,25
0,20	0,80	0,00	760450412,89	454894,70	274272,51	260,69	-84,65	258,7687	179,42
0,30	0,00	0,70	743938267,67	500015,12	156953,71	724,75	-67,06	262,8104	139,33
0,30	0,10	0,60	729174019,14	472870,79	186791,60	579,26	-71,62	260,2533	150,88
0,30	0,20	0,50	723920832,21	442245,72	222102,32	496,44	-74,51	256,3676	153,19
0,30	0,30	0,40	723054134,88	423280,86	244428,31	461,21	-75,97	254,4455	157,41
0,30	0,40	0,30	723328115,55	411063,62	259062,25	443,35	-76,75	253,9082	156,94
0,30	0,50	0,20	723999393,39	403082,16	269158,96	431,32	-77,38	254,6112	159,31
0,30	0,60	0,10	725818361,14	402024,42	274215,79	413,15	-78,25	256,6136	171,39
0,30	0,70	0,00	729944892,22	409599,49	274316,29	383,58	-79,44	259,6541	185,00
0,40	0,00	0,60	743693302,92	500033,59	156887,10	723,11	-65,74	262,8152	165,84
0,40	0,10	0,50	731813147,06	481991,67	176537,23	610,70	-69,68	262,0616	183,25
0,40	0,20	0,40	725577920,54	456239,55	205779,90	529,65	-72,92	257,6718	164,98
0,40	0,30	0,30	723408580,94	436648,16	228655,01	484,21	-74,73	255,8686	156,47
0,40	0,40	0,20	722986811,14	423328,77	244360,83	460,81	-75,75	254,4753	162,52
0,40	0,50	0,10	723163606,87	413739,20	255823,66	446,67	-76,35	253,9384	169,72
0,40	0,60	0,00	723568102,68	406512,23	264621,71	436,95	-76,75	254,1614	165,58
0,50	0,00	0,50	743537898,64	500044,35	156845,74	722,07	-64,86	262,8182	143,89
0,50	0,10	0,40	733788624,25	487428,75	170493,83	632,22	-68,31	263,1819	152,45
0,50	0,20	0,30	727332699,18	466048,01	194503,59	556,51	-71,57	259,0932	148,00
0,50	0,30	0,20	724323117,21	447575,72	215842,02	507,54	-73,56	256,8427	154,83
0,50	0,40	0,10	723205453,45	433613,80	232215,44	478,14	-74,78	255,5681	156,58
<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>722945594,59</b>	<b>423356,97</b>	<b>244321,96</b>	<b>460,56</b>	<b>-75,53</b>	<b>254,4937</b>	<b>163,58</b>
0,60	0,00	0,40	743421268,83	500049,98	156817,64	721,28	-64,22	262,8201	156,41
0,60	0,10	0,30	735205134,71	490701,52	166878,86	646,87	-67,31	263,7703	165,88
0,60	0,20	0,20	728965427,23	473134,78	186449,74	578,17	-70,39	260,3698	150,81
0,60	0,30	0,10	725473485,66	456343,09	205641,35	529,08	-72,50	257,7165	167,61
0,60	0,40	0,00	723753277,67	442395,86	221899,34	495,48	-73,85	256,4384	165,16
0,70	0,00	0,30	743343235,50	500057,65	156794,34	720,76	-63,77	262,8244	181,45
0,70	0,10	0,20	736324399,44	492960,90	164398,24	658,04	-66,54	264,1286	150,17
0,70	0,20	0,10	730412804,55	478383,83	180535,84	595,78	-69,38	261,4051	159,05
0,70	0,30	0,00	726674297,16	463274,84	197660,41	547,83	-71,50	258,6814	145,30
0,80	0,00	0,20	743273090,85	500062,10	156776,31	720,29	-63,43	262,8275	130,81
0,80	0,10	0,10	737130974,22	494372,36	162851,10	665,90	-65,95	264,2573	154,45
0,80	0,20	0,00	731630481,38	482218,93	176242,53	609,74	-68,54	262,1685	143,03
0,90	0,00	0,10	743226339,79	500067,88	156761,04	719,98	-63,16	262,8316	142,84
0,90	0,10	0,00	737804042,96	495487,15	161636,52	672,34	-65,45	264,3752	130,83
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>743180099,45</b>	<b>500071,41</b>	<b>156748,49</b>	<b>719,67</b>	<b>-62,94</b>	<b>262,8345</b>	<b>163,84</b>

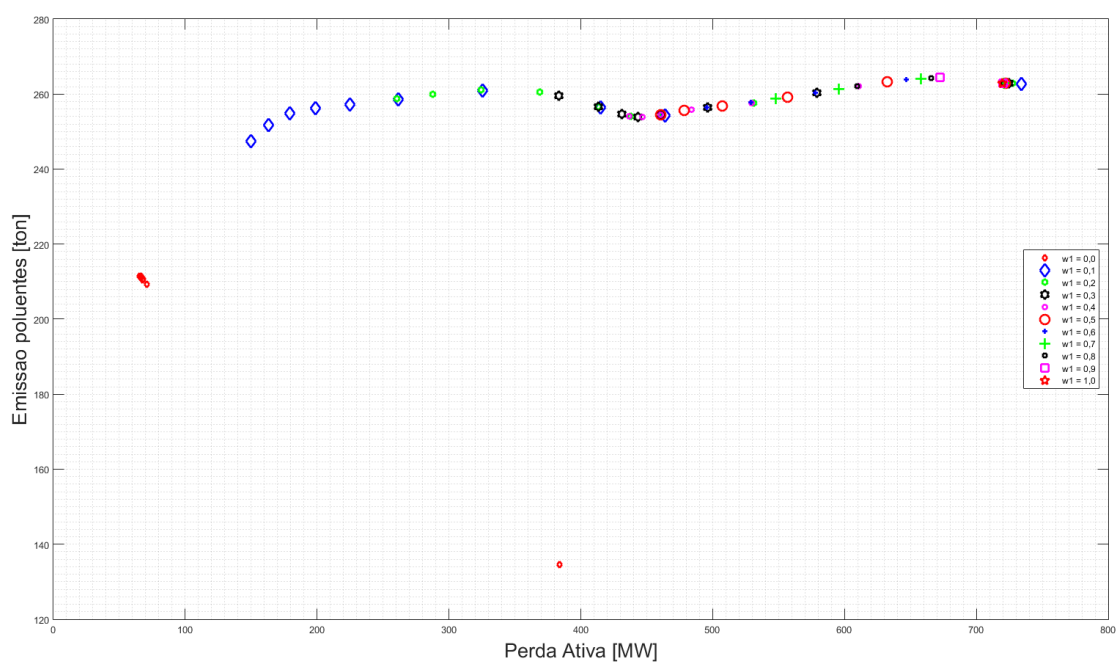
Fonte: Próprio Autor

Tabela 22 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	702301282,24	283494486,86	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	837833848,25	194732483,38	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	837572090,71	194873145,70	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	837455933,67	195038422,31	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	837303154,95	195078619,84	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	837219301,71	195113253,25	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	837146618,82	195184286,12	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	837078448,33	195267165,41	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	837071055,87	195200904,91	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	837028606,59	195235687,21	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	836998113,60	195257811,41	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	499828602,97	157425929,55	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	422893524,00	244953938,83	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	401912678,97	274425166,74	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	429386904,44	273576823,30	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	454979314,04	274209675,75	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	474213912,99	274454587,29	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	492717704,17	272884880,70	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	510405693,72	270327728,18	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	528083488,73	267073704,27	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	545354073,76	263632722,97	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	499975912,45	157076958,10	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	455946821,30	206165230,86	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	423180599,99	244565475,48	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	406425837,76	264747607,29	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	401998415,57	274266264,75	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	414209277,46	274040434,69	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	429319378,36	273578017,54	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	443319706,63	273848604,80	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	454894703,51	274272507,50	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	500015118,09	156953708,11	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	472870793,86	186791603,42	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	442245717,04	222102322,46	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	423280855,62	244428306,82	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	411063621,73	259062247,49	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	403082161,80	269158964,38	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	402024419,77	274215794,19	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	409599490,06	274316286,24	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	500033588,00	156887099,82	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	481991670,37	176537233,10	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	456239546,58	205779900,74	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	436648162,12	228655007,89	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	423328765,23	244360831,02	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	413739197,39	255823659,75	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	406512226,04	264621709,23	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	500044349,09	156845740,41	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	487428754,65	170493830,30	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	466048008,22	194503585,54	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	447575720,35	215842024,19	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	433613796,96	232215437,25	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	423356970,47	244321961,43	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	500049976,45	156817644,29	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	490701520,73	166878864,50	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	473134778,25	186449738,50	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	456343094,49	205641349,36	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	442395858,94	221899342,67	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	500057654,92	156794335,39	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	492960895,80	164398241,01	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	478383833,49	180535844,75	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	463274844,37	197660406,93	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	500062096,08	156776309,08	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	494372362,18	162851103,69	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	482218926,58	176242531,20	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	500067883,96	156761042,10	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	495487151,40	161636520,93	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	500071406,15	156748493,86	0,00	0,00

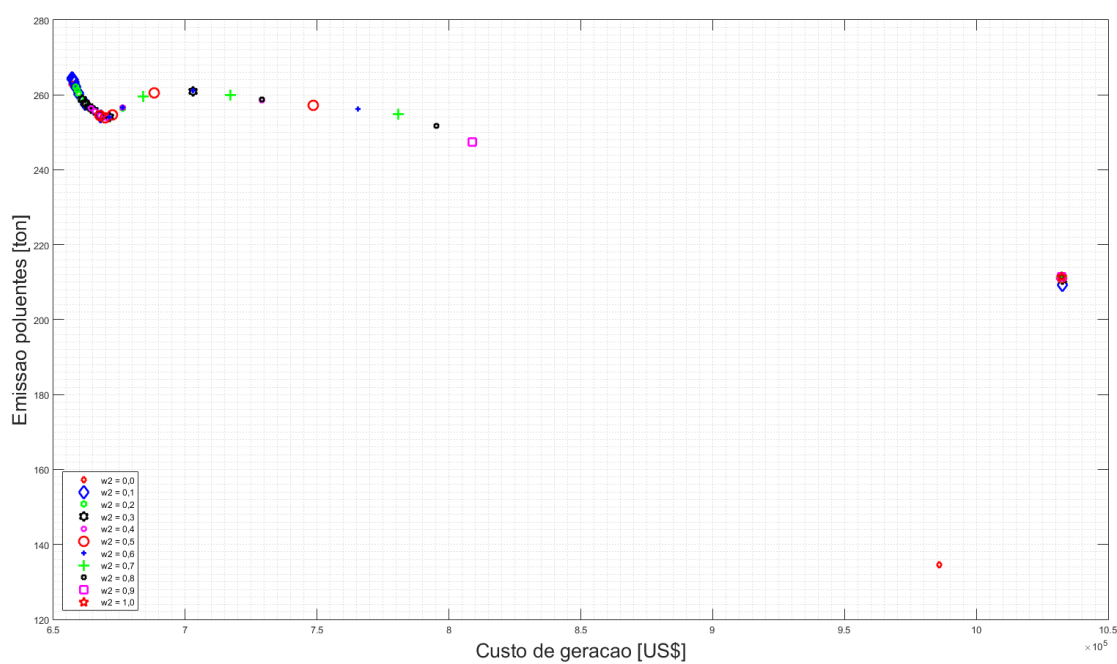
Fonte: Próprio Autor

Figura 39 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2



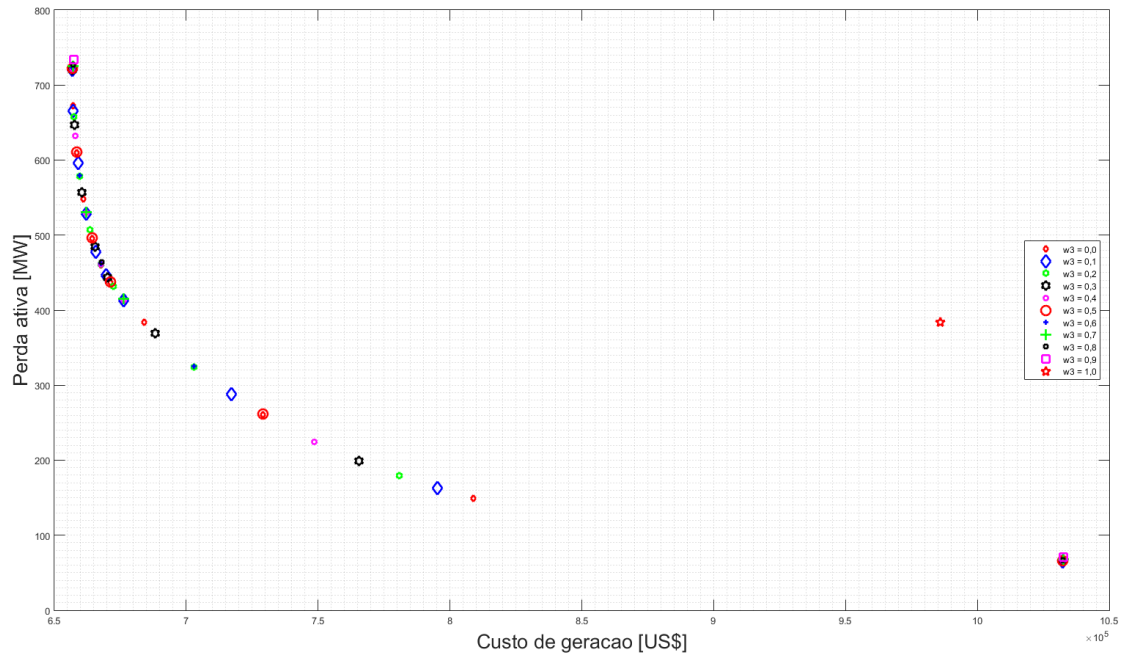
Fonte: Próprio Autor

Figura 40 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2



Fonte: Próprio Autor

Figura 41 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (21) verifica-se que o menor valor de custo total de geração de energia elétrica considerando as gerações termoelétrica e hidroelétrica é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,50$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,00$  com os valores de perda ativa e emissão de poluentes do sistema elevados. Comparando-se os resultados das Tabelas (19) e (21) verifica-se a redução dos valores de custos totais de geração e emissão de poluentes e aumento dos valores de perda ativa. Na Tabela (22) verifica-se a redução dos custos de geração de energia das gerações termoelétricas em relação à Tabela (20), devido aos baixos custos de geração das usinas hidroelétricas em relação às gerações termoelétricas. O conjunto de soluções da Tabela (21), caso necessário, possibilita que o operador do sistema selecione soluções com valores de custo total de geração maiores com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores.

Nas Figura (39) e (40) ilustram-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes e de custo de geração e emissão de poluentes, respectivamente.

A Figura (41) apresenta o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e perda ativa.

Tabela 23 – Sistema IEEE118 - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{GerN, Ren}$	$10^3 \$_{GerRen}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1014103197,82</b>	<b>733137,31</b>	<b>234666,94</b>	<b>385,82</b>	<b>-113,20</b>	<b>132,8067</b>	<b>126,31</b>
0,00	0,10	0,90	1038854067,81	874703,60	154422,87	81,06	-95,40	209,9039	166,52
0,00	0,20	0,80	1038331608,66	874115,36	154834,23	78,18	-94,76	210,9215	164,05
0,00	0,30	0,70	1037732160,18	873717,93	154999,27	75,12	-94,77	211,3928	161,72
0,00	0,40	0,60	1037765582,02	873552,62	155162,14	75,42	-94,86	211,6117	185,58
0,00	0,50	0,50	1037593595,52	873446,73	155204,97	74,52	-95,03	211,7607	169,95
0,00	0,60	0,40	1037552672,91	873380,17	155253,30	74,33	-95,18	211,8748	192,66
0,00	0,70	0,30	1037617800,21	873298,79	155338,30	74,84	-95,22	211,9376	185,56
0,00	0,80	0,20	1037625436,35	873247,05	155382,21	74,97	-95,28	211,9983	181,14
0,00	0,90	0,10	1037808387,48	873170,91	155500,39	76,14	-95,27	212,0502	190,84
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1037670661,99</b>	<b>873163,61</b>	<b>155467,80</b>	<b>75,33</b>	<b>-95,31</b>	<b>212,0968</b>	<b>181,33</b>
0,10	0,00	0,90	729633981,24	454744,34	195103,55	664,88	-78,13	230,4551	148,58
0,10	0,10	0,80	713641474,92	426270,28	229300,17	483,93	-78,84	248,3726	170,70
0,10	0,20	0,70	715954887,75	420401,67	242445,22	442,57	-79,27	256,0155	181,44
0,10	0,30	0,60	730739461,15	451461,82	236238,00	358,66	-82,20	261,4305	172,77
0,10	0,40	0,50	749287915,48	478848,36	235011,89	295,23	-84,80	259,2347	197,88
0,10	0,50	0,40	767339628,59	504170,42	232983,37	251,55	-86,88	256,4467	196,73
0,10	0,60	0,30	784500281,54	528880,54	229291,35	219,40	-88,32	254,1108	195,14
0,10	0,70	0,20	800056242,81	551523,87	225068,89	195,53	-89,35	251,8514	224,73
0,10	0,80	0,10	814502621,84	572385,76	220887,53	176,91	-90,13	248,2557	208,89
0,10	0,90	0,00	827880242,55	591468,69	216975,55	161,97	-90,73	243,9860	274,39
0,20	0,00	0,80	728675349,70	454617,63	195042,31	658,46	-74,38	230,3018	157,34
0,20	0,10	0,70	714652996,78	435326,26	217543,88	514,86	-76,56	241,0816	167,50
0,20	0,20	0,60	713311306,98	426271,59	229221,24	481,82	-77,09	248,3727	189,16
0,20	0,30	0,50	713671684,18	419160,29	238816,53	464,12	-77,66	252,2780	183,98
0,20	0,40	0,40	715729714,08	420259,43	242528,10	441,18	-78,69	256,1157	201,48
0,20	0,50	0,30	722134262,31	435466,03	238888,32	398,17	-80,46	260,6306	238,50
0,20	0,60	0,20	730559734,56	451284,39	236349,45	357,72	-82,16	261,6392	266,89
0,20	0,70	0,10	740043635,27	465828,03	235537,41	322,32	-83,61	260,7073	305,48
0,20	0,80	0,00	749157535,31	478672,34	235141,83	294,53	-84,82	259,4742	401,92
0,30	0,00	0,70	728225864,41	454542,93	195033,16	655,41	-72,44	230,2286	167,45
0,30	0,10	0,60	716523943,48	441837,16	209656,22	541,92	-74,62	238,5263	175,00
0,30	0,20	0,50	713635192,76	431297,59	222566,78	498,09	-76,10	243,6617	186,98
0,30	0,30	0,40	713170764,85	426257,52	229205,74	480,90	-76,64	248,3701	221,45
0,30	0,40	0,30	713349405,30	421100,04	236014,87	468,62	-77,14	251,2079	196,31
0,30	0,50	0,20	713940662,75	417771,67	241205,02	458,03	-77,65	253,2970	212,13
0,30	0,60	0,10	715657284,14	420194,40	242572,80	440,75	-78,43	256,1495	191,73
0,30	0,70	0,00	719650800,91	430073,58	240108,75	412,24	-79,60	259,5506	214,81
0,40	0,00	0,60	727956075,83	454498,50	195027,88	653,58	-71,17	230,1880	177,30
0,40	0,10	0,50	718325014,01	446217,71	204495,31	563,43	-73,28	237,2408	175,73
0,40	0,20	0,40	714374791,36	435400,07	217395,80	513,16	-75,23	241,0934	179,23
0,40	0,30	0,30	713338993,18	429824,59	224457,80	492,14	-76,00	244,9290	191,58
0,40	0,40	0,20	713112958,25	426247,69	229202,32	480,52	-76,38	248,3691	221,13
0,40	0,50	0,10	713217503,37	422282,87	234412,44	471,02	-76,77	250,6483	194,34
0,40	0,60	0,00	713535673,11	419050,65	238904,90	463,17	-77,07	252,2574	227,89
0,50	0,00	0,50	727782530,47	454471,13	195023,26	652,40	-70,24	230,1641	173,47
0,50	0,10	0,40	719723779,87	448909,43	201366,25	578,73	-72,29	236,4365	187,13
0,50	0,20	0,30	715307629,11	438951,66	213062,79	527,44	-74,40	239,5706	197,38
0,50	0,30	0,20	713731202,81	432727,04	220712,73	502,43	-75,43	242,6268	204,98
0,50	0,40	0,10	713212614,02	429041,93	225477,87	489,11	-75,87	245,6841	194,66
<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>713070388,24</b>	<b>426238,61</b>	<b>229203,03</b>	<b>480,24</b>	<b>-76,14</b>	<b>248,3664</b>	<b>232,41</b>
0,60	0,00	0,40	727665334,18	454452,73	195019,85	651,61	-69,55	230,1483	177,69
0,60	0,10	0,30	720760178,49	450516,55	199505,91	589,48	-71,56	235,8063	182,47
0,60	0,20	0,20	716284071,71	441932,84	209492,71	540,49	-73,67	238,5542	191,98
0,60	0,30	0,10	714269443,62	435425,48	217342,60	512,51	-74,90	241,1022	196,41
0,60	0,40	0,00	713457515,26	431317,95	222502,97	496,97	-75,42	243,6714	201,28
0,70	0,00	0,30	727568965,96	454437,56	195017,44	650,95	-69,05	230,1360	186,50
0,70	0,10	0,20	721555131,27	451564,02	198296,59	597,45	-71,00	235,2959	186,69
0,70	0,20	0,10	717244715,62	444389,59	206591,78	552,19	-73,07	237,8335	190,31
0,70	0,30	0,00	714883655,71	437864,87	214359,97	522,16	-74,38	240,0353	190,09
0,80	0,00	0,20	727498314,72	454427,09	195014,93	650,47	-68,67	230,1276	181,95
0,80	0,10	0,10	722196804,11	452304,10	197446,01	603,72	-70,55	234,8794	196,42
0,80	0,20	0,00	718115897,83	446309,71	204343,57	562,19	-72,55	237,2734	192,95
0,90	0,00	0,10	727445731,93	454419,14	195012,95	650,11	-68,40	230,1212	180,66
0,90	0,10	0,00	722705720,00	452831,52	196839,21	608,62	-70,19	234,5269	217,50
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>727398321,61</b>	<b>454411,93</b>	<b>195011,45</b>	<b>649,79</b>	<b>-68,20</b>	<b>230,1157</b>	<b>181,64</b>

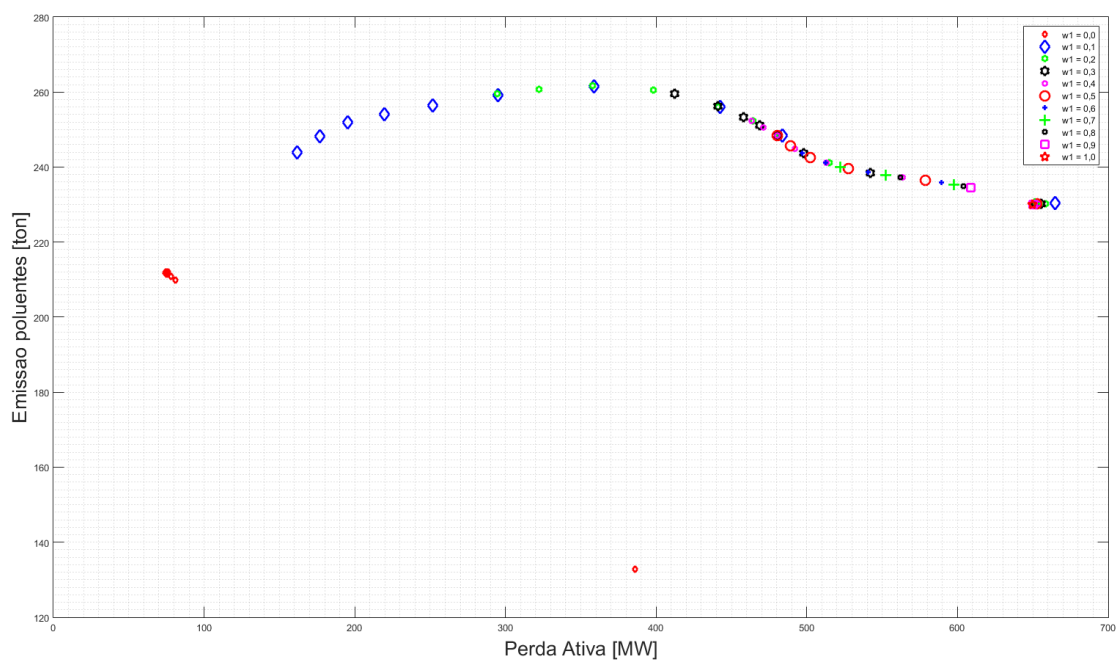
Fonte: Próprio Autor

Tabela 24 – Sistema IEEE118 - Custos individuais de geração - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	733137310,93	169650788,90	40162578,89	24853567,91
0,00	0,10	0,90	874703601,19	98834942,50	38883016,88	16704905,93
0,00	0,20	0,80	874115358,50	99252812,10	38896839,32	16684577,40
0,00	0,30	0,70	873717926,21	99412077,02	38893440,15	16693750,57
0,00	0,40	0,60	873552624,59	99559045,56	38920332,53	16682765,45
0,00	0,50	0,50	873446728,51	99593874,23	38925679,75	16685412,41
0,00	0,60	0,40	873380165,05	99634815,64	38936797,40	16681685,63
0,00	0,70	0,30	873298794,99	99712082,95	38948681,06	16677538,39
0,00	0,80	0,20	873247049,01	99750734,15	38955685,60	16675786,73
0,00	0,90	0,10	873170906,86	99861570,89	38975054,64	16663761,40
0,00	1,00	0,00	873163611,52	99828566,49	38971196,52	16668033,92
0,10	0,00	0,90	454744343,93	154012233,34	40390509,69	700805,45
0,10	0,10	0,80	426270283,57	188329153,75	40192247,13	778765,09
0,10	0,20	0,70	420401671,62	198133941,09	40098029,97	4213252,11
0,10	0,30	0,60	451461824,08	188492569,34	40072887,95	7672538,51
0,10	0,40	0,50	478848364,51	185341392,82	40045700,14	9624798,56
0,10	0,50	0,40	504170419,45	181772799,55	40014401,71	11196167,05
0,10	0,60	0,30	528880543,91	176980511,14	39981633,38	12329207,61
0,10	0,70	0,20	551523871,89	172099143,32	39949029,91	13020718,45
0,10	0,80	0,10	572385758,59	167591340,33	39918822,76	13377371,77
0,10	0,90	0,00	591468686,40	163479223,24	39889176,30	13607154,27
0,20	0,00	0,80	454617627,55	153894475,63	40447024,23	700805,49
0,20	0,10	0,70	435326256,38	176527053,52	40315924,90	700900,98
0,20	0,20	0,60	426271594,21	188233587,16	40226160,07	761495,78
0,20	0,30	0,50	419160285,97	196254614,14	40163091,02	2398821,35
0,20	0,40	0,40	420259431,05	198231021,29	40127203,43	4169871,66
0,20	0,50	0,30	435466025,25	192918279,20	40111729,90	5858308,37
0,20	0,60	0,20	451284390,13	188598274,19	40097515,02	7653661,29
0,20	0,70	0,10	465828032,59	186673519,95	40081750,27	8782135,61
0,20	0,80	0,00	478672336,71	185441618,73	40065936,84	9634276,93
0,30	0,00	0,70	454542931,15	153861290,30	40471056,36	700811,00
0,30	0,10	0,60	441837155,53	168580865,78	40374504,28	700852,02
0,30	0,20	0,50	431297592,07	181567735,52	40298198,22	700842,33
0,30	0,30	0,40	426257524,20	188207268,87	40241059,03	757410,62
0,30	0,40	0,30	421100038,05	194146358,59	40194999,31	1673514,17
0,30	0,50	0,20	417771666,34	197990684,11	40159716,62	3054618,57
0,30	0,60	0,10	420194404,08	198279815,53	40138587,05	4154395,42
0,30	0,70	0,00	430073582,26	194774707,92	40126993,02	5207048,40
0,40	0,00	0,60	454498497,79	153842454,68	40484612,94	700813,70
0,40	0,10	0,50	446217706,33	163386643,13	40407849,95	700815,22
0,40	0,20	0,40	435400069,62	176351179,97	40343759,09	700863,89
0,40	0,30	0,30	429824588,84	183465004,34	40291876,34	700920,44
0,40	0,40	0,20	426247693,22	188197284,86	40249665,83	755373,69
0,40	0,50	0,10	422282874,47	192868279,28	40213303,43	1330855,03
0,40	0,60	0,00	419050647,12	196327691,87	40182858,09	2394350,12
0,50	0,00	0,50	454471133,15	153829523,11	40492919,54	700813,05
0,50	0,10	0,40	448909426,26	160236109,76	40429317,80	700826,51
0,50	0,20	0,30	438951661,33	171986972,87	40374998,67	700821,31
0,50	0,30	0,20	432727043,04	179683942,02	40327872,26	700914,25
0,50	0,40	0,10	429041929,00	184488187,30	40288773,79	700913,06
0,50	0,50	0,00	426238613,48	188192993,81	40254805,46	755231,44
0,60	0,00	0,40	454452726,06	153820518,57	40498528,35	700807,35
0,60	0,10	0,30	450516548,32	158360864,07	40444225,36	700820,98
0,60	0,20	0,20	441932835,61	168394599,97	40397257,45	700854,49
0,60	0,30	0,10	435425475,37	176286550,10	40355172,54	700879,00
0,60	0,40	0,00	431317951,94	181483629,08	40318440,68	700902,47
0,70	0,00	0,30	454437557,20	153814215,61	40502407,59	700814,67
0,70	0,10	0,20	451564024,71	157140589,21	40455177,46	700826,05
0,70	0,20	0,10	444389588,54	165477094,86	40413843,98	700841,62
0,70	0,30	0,00	437864873,83	173282893,04	40376222,64	700857,23
0,80	0,00	0,20	454427092,27	153808845,55	40505271,84	700814,43
0,80	0,10	0,10	452304096,13	156281539,76	40463655,20	700817,09
0,80	0,20	0,00	446309713,90	163216046,79	40426705,40	700820,72
0,90	0,00	0,10	454419136,66	153804667,26	40507477,16	700809,09
0,90	0,10	0,00	452831516,45	155668091,03	40470288,00	700831,85
1,00	0,00	0,00	454411931,83	153801419,64	40509223,41	700810,24

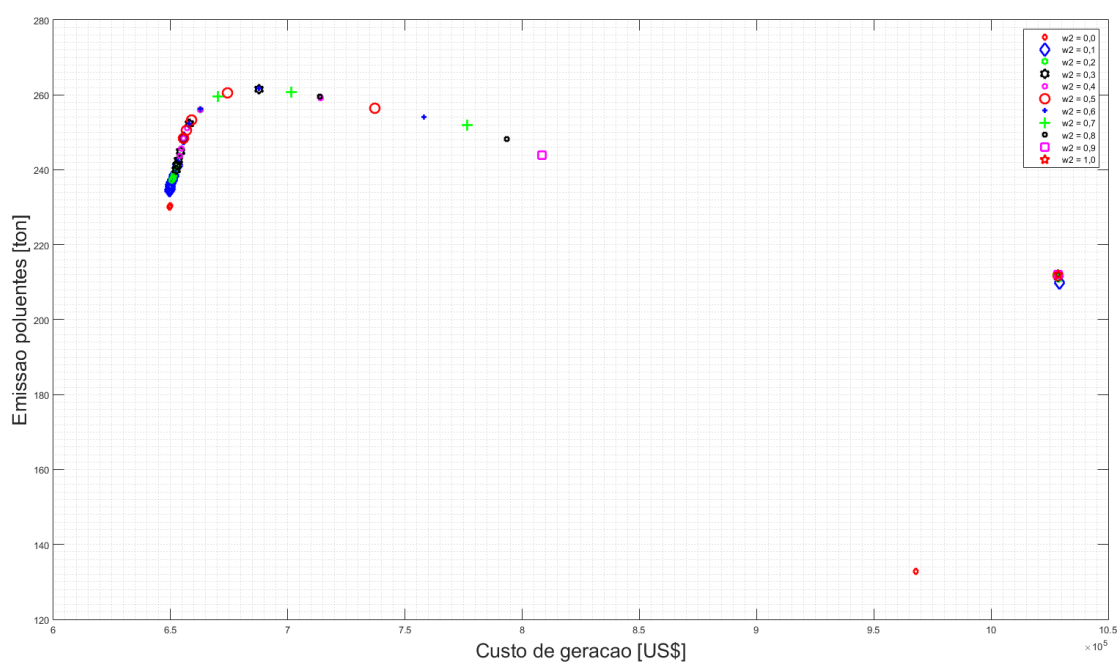
Fonte: Próprio Autor

Figura 42 – Sistema IEEE118 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3



Fonte: Próprio Autor

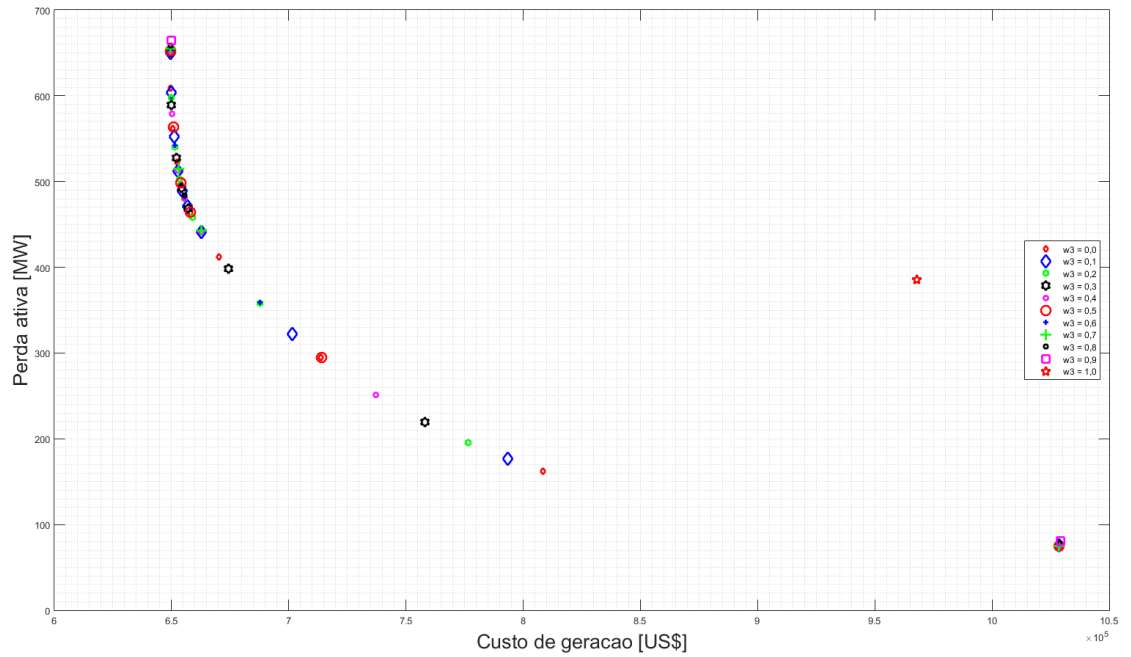
Figura 43 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E3



Fonte: Próprio Autor



Figura 44 – Sistema IEEE118 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (23) verifica-se que o menor valor de custo total de geração adotando todos os tipos de gerações de energia é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,50$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,00$  com valores de perda ativa e emissão de poluentes elevados.

Comparando os resultados das Tabelas (21) e (23) verifica-se a redução dos valores de custos totais de geração e emissão de poluentes e aumento dos valores da perda ativa. O aumento dos valores de perda ativa está associado à localização das gerações eólica e fotovoltaica, que possuem menores custos de geração. Na Tabela (24) observa-se a redução dos custos de geração de energia das gerações termoeletricas em relação à Tabela (22), já que as gerações renováveis apresentam custos de geração de energia menores que as gerações termoeletricas. O conjunto de soluções da Tabela (23), caso necessário, permite que o operador do sistema selecione soluções com valor de custo total de geração superior e valores de perda ativa e emissão de poluente inferiores.

Nas Figuras (42) e (43) apresentam-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluente e de custo de geração e emissão de poluentes, respectivamente.

Na Figura (44) apresenta-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e perda ativa do sistema.

## 5.7 MODELO ESTOCÁSTICO - SISTEMA ACTIVSG200

Devido ao grande porte e média complexidade computacional do sistema ACTIVSg200, efetuaram-se as seguintes modificações na simulação com o modelo estocástico:

- Utilização de três blocos de tempos (B1, B2 e B3);
- Utilização de dois níveis de demanda (Alto e Nominal);
- Utilização de dois níveis de velocidade do vento (Alto e Nominal).

O modelo estocástico multiobjetivo do sistema ACTIVSg200 é simulado adotando a faixa de  $[0, 95, 1, 05]$   $[p.u]$  para as magnitudes das tensões, tolerância angular de  $0, 25$   $[grau]$  e utilizando os dados estocásticos de blocos de tempos, níveis de demanda, velocidade de vento, irradiação solar e respectivas probabilidades apresentadas na Tabela (47) do Anexo (A).

As Tabelas (25), (27) e (29) apresentam os custos totais, custos de geração renovável, custos de geração não renovável, perdas ativas, perdas reativas e tempo computacional para os casos E1, E2 e E3, respectivamente.

Nas Figuras (45) - (47), (49) - (51) e (53) - (55) apresentam-se graficamente os resultados das Tabelas (25), (27) e (29) fixando os pesos de uma das componentes da função objetivo.

Tabela 25 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3 \$_{GerN.Ren}$	$10^3 \$_{GerRen}$	$10^3 P_a$	$10^3 P_r$	$10^2 Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>682407289,93</b>	<b>464491,15</b>	<b>0,00</b>	<b>1815,97</b>	<b>35,69</b>	<b>201,9475</b>	<b>29,64</b>
0,00	0,10	0,90	430293553,19	427555,76	0,00	22,81	-6,56	208,7231	63,42
0,00	0,20	0,80	431301740,45	427703,22	0,00	29,99	-6,57	208,7212	66,52
0,00	0,30	0,70	430283707,78	427529,95	0,00	22,95	-6,59	208,7969	66,50
0,00	0,40	0,60	430079350,99	427474,73	0,00	21,71	-6,55	208,8652	63,83
0,00	0,50	0,50	430585294,84	427558,58	0,00	25,22	-6,57	208,8306	60,34
0,00	0,60	0,40	431295624,75	427674,63	0,00	30,17	-6,57	208,7915	60,80
0,00	0,70	0,30	431253924,02	427673,59	0,00	29,84	-6,57	208,7925	59,94
0,00	0,80	0,20	431056747,95	427630,86	0,00	28,55	-6,56	208,8165	55,53
0,00	0,90	0,10	430193482,91	427483,20	0,00	22,59	-6,56	208,8772	54,64
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>430058190,07</b>	<b>427464,88</b>	<b>0,00</b>	<b>21,61</b>	<b>-6,56</b>	<b>208,8779</b>	<b>48,61</b>
0,10	0,00	0,90	393712863,38	383030,43	0,00	89,02	-5,47	356,9456	101,33
0,10	0,10	0,80	393638927,28	383045,21	0,00	88,28	-5,47	357,7212	81,70
0,10	0,20	0,70	393638851,03	383048,02	0,00	88,26	-5,47	357,8037	78,38
0,10	0,30	0,60	393615017,94	383047,27	0,00	88,06	-5,47	357,8323	79,92
0,10	0,40	0,50	393673090,99	383121,98	0,00	87,93	-5,50	357,4680	72,00
0,10	0,50	0,40	396301849,30	386502,45	0,00	81,66	-5,65	338,1282	74,66
0,10	0,60	0,30	400325133,42	391488,88	0,00	73,64	-5,90	312,8810	80,27
0,10	0,70	0,20	404265430,20	396066,18	0,00	68,33	-6,11	293,1785	74,92
0,10	0,80	0,10	407672505,49	399997,80	0,00	63,96	-6,26	277,8523	72,84
0,10	0,90	0,00	410539178,59	403266,55	0,00	60,61	-6,38	266,0222	74,94
0,20	0,00	0,80	393713122,04	383030,60	0,00	89,02	-5,47	356,9520	94,97
0,20	0,10	0,70	393643923,81	383041,15	0,00	88,36	-5,48	357,5735	87,31
0,20	0,20	0,60	393633588,78	383044,63	0,00	88,24	-5,47	357,7238	79,27
0,20	0,30	0,50	393633233,03	383046,36	0,00	88,22	-5,47	357,7753	78,73
0,20	0,40	0,40	393624635,54	383046,48	0,00	88,15	-5,47	357,8041	76,11
0,20	0,50	0,30	393607137,84	383045,55	0,00	88,01	-5,47	357,8213	77,92
<b>0,20</b>	<b>0,60</b>	<b>0,20</b>	<b>393605943,05</b>	<b>383046,49</b>	<b>0,00</b>	<b>88,00</b>	<b>-5,47</b>	<b>357,8315</b>	<b>76,41</b>
0,20	0,70	0,10	393606999,05	383058,48	0,00	87,90	-5,48	357,7726	73,77
0,20	0,80	0,00	393652750,18	383119,72	0,00	87,78	-5,51	357,4690	79,05
0,30	0,00	0,70	393710908,88	383030,36	0,00	89,00	-5,47	356,9542	101,13
0,30	0,10	0,60	393642033,64	383037,51	0,00	88,37	-5,48	357,4656	88,05
0,30	0,20	0,50	393633030,01	383041,82	0,00	88,26	-5,48	357,6377	90,06
0,30	0,30	0,40	393634312,51	383044,74	0,00	88,25	-5,47	357,7249	85,47
0,30	0,40	0,30	393637133,74	383046,38	0,00	88,26	-5,47	357,7633	79,13
0,30	0,50	0,20	393640149,57	383047,57	0,00	88,27	-5,47	357,7873	79,38
0,30	0,60	0,10	393638603,07	383048,05	0,00	88,25	-5,47	357,8057	88,55
0,30	0,70	0,00	393624241,87	383047,06	0,00	88,14	-5,47	357,8185	83,05
0,40	0,00	0,60	393711362,84	383030,45	0,00	89,01	-5,47	356,9553	100,27
0,40	0,10	0,50	393653690,00	383036,17	0,00	88,48	-5,48	357,3747	89,25
0,40	0,20	0,40	393639881,51	383040,70	0,00	88,33	-5,48	357,5756	86,05
0,40	0,30	0,30	393636755,02	383043,13	0,00	88,28	-5,47	357,6648	84,55
0,40	0,40	0,20	393639835,94	383045,44	0,00	88,29	-5,47	357,7260	79,22
0,40	0,50	0,10	393639708,43	383046,44	0,00	88,28	-5,47	357,7566	82,14
0,40	0,60	0,00	393633719,37	383046,44	0,00	88,23	-5,47	357,7761	80,30
0,50	0,00	0,50	393712199,57	383030,57	0,00	89,01	-5,47	356,9560	103,16
0,50	0,10	0,40	393656186,24	383034,51	0,00	88,51	-5,48	357,3103	92,34
0,50	0,20	0,30	393644610,49	383039,79	0,00	88,37	-5,48	357,5284	87,48
0,50	0,30	0,20	393641815,69	383042,21	0,00	88,33	-5,48	357,6160	86,08
0,50	0,40	0,10	393634161,74	383043,28	0,00	88,26	-5,47	357,6796	83,36
0,50	0,50	0,00	393636712,38	383045,07	0,00	88,26	-5,47	357,7260	78,94
0,60	0,00	0,40	393712464,07	383030,61	0,00	89,02	-5,47	356,9564	104,44
0,60	0,10	0,30	393658772,35	383033,38	0,00	88,54	-5,48	357,2627	95,39
0,60	0,20	0,20	393647401,10	383038,27	0,00	88,41	-5,48	357,4684	93,16
0,60	0,30	0,10	393640542,77	383040,80	0,00	88,33	-5,48	357,5764	85,88
0,60	0,40	0,00	393638153,59	383042,50	0,00	88,30	-5,48	357,6393	89,17
0,70	0,00	0,30	393711964,51	383030,56	0,00	89,01	-5,47	356,9567	96,53
0,70	0,10	0,20	393664455,08	383032,99	0,00	88,60	-5,48	357,2264	94,92
0,70	0,20	0,10	393648972,33	383036,90	0,00	88,43	-5,48	357,4178	89,19
0,70	0,30	0,00	393637978,10	383039,43	0,00	88,32	-5,48	357,5434	92,31
0,80	0,00	0,20	393710972,04	383030,43	0,00	89,00	-5,47	356,9569	99,16
0,80	0,10	0,10	393669485,64	383032,76	0,00	88,64	-5,48	357,1977	96,47
0,80	0,20	0,00	393650893,20	383035,86	0,00	88,46	-5,48	357,3767	93,22
0,90	0,00	0,10	393710841,03	383030,42	0,00	89,00	-5,47	356,9571	96,88
0,90	0,10	0,00	393672984,20	383032,49	0,00	88,67	-5,47	357,1746	96,25
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>393710276,58</b>	<b>383030,35</b>	<b>0,00</b>	<b>89,00</b>	<b>-5,47</b>	<b>356,9573</b>	<b>95,66</b>

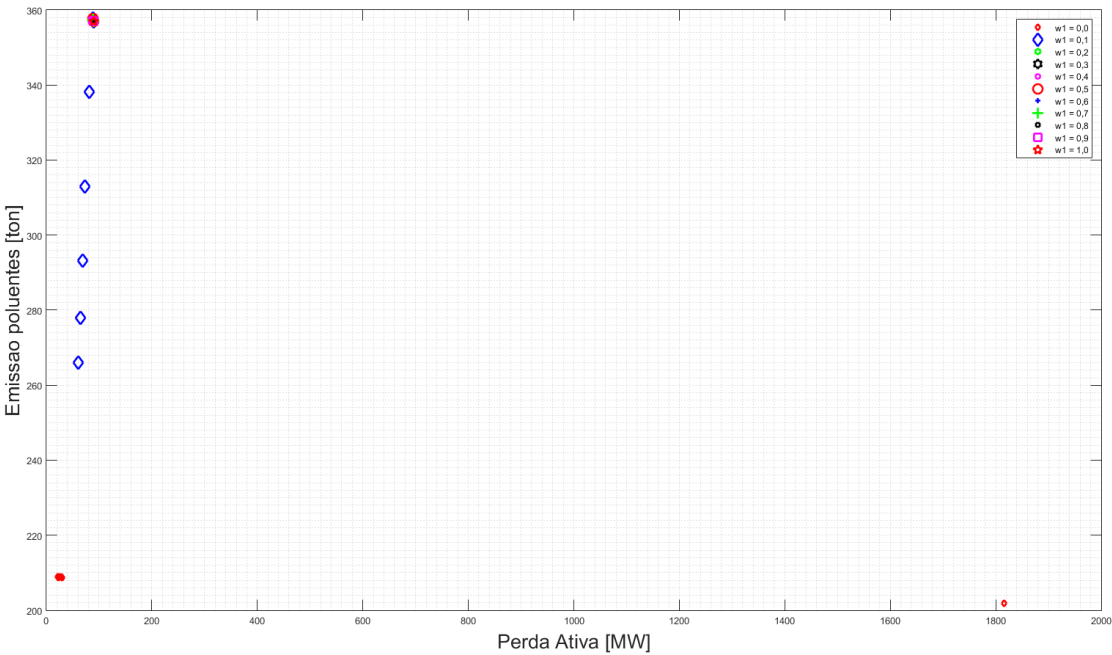
Fonte: Próprio Autor

Tabela 26 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E1

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	464491145,43	0,00	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	427555762,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	427703220,33	0,00	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	427529954,65	0,00	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	427474731,71	0,00	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	427558578,37	0,00	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	427674632,28	0,00	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	427673587,55	0,00	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	427630855,64	0,00	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	427483200,33	0,00	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	427464878,66	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	383030428,86	0,00	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	383045205,96	0,00	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	383048017,07	0,00	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	383047274,91	0,00	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	383121980,07	0,00	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	386502448,13	0,00	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	391488882,28	0,00	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	396066175,06	0,00	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	399997795,70	0,00	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	403266551,93	0,00	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	383030604,45	0,00	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	383041148,39	0,00	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	383044628,36	0,00	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	383046355,91	0,00	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	383046482,22	0,00	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	383045547,15	0,00	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	383046494,99	0,00	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	383058475,03	0,00	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	383119716,61	0,00	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	383030362,31	0,00	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	383037514,99	0,00	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	383041817,27	0,00	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	383044744,75	0,00	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	383046378,63	0,00	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	383047569,95	0,00	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	383048050,83	0,00	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	383047056,90	0,00	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	383030446,01	0,00	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	383036171,13	0,00	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	383040697,12	0,00	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	383043131,65	0,00	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	383045444,90	0,00	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	383046443,66	0,00	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	383046437,46	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	383030570,22	0,00	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	383034506,74	0,00	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	383039787,01	0,00	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	383042214,81	0,00	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	383043278,48	0,00	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	383045065,35	0,00	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	383030614,59	0,00	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	383033377,73	0,00	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	383038273,31	0,00	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	383040800,90	0,00	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	383042497,78	0,00	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	383030556,08	0,00	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	383032991,05	0,00	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	383036899,80	0,00	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	383039425,28	0,00	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	383030431,15	0,00	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	383032755,64	0,00	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	383035864,78	0,00	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	383030418,05	0,00	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	383032488,22	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	383030347,18	0,00	0,00	0,00

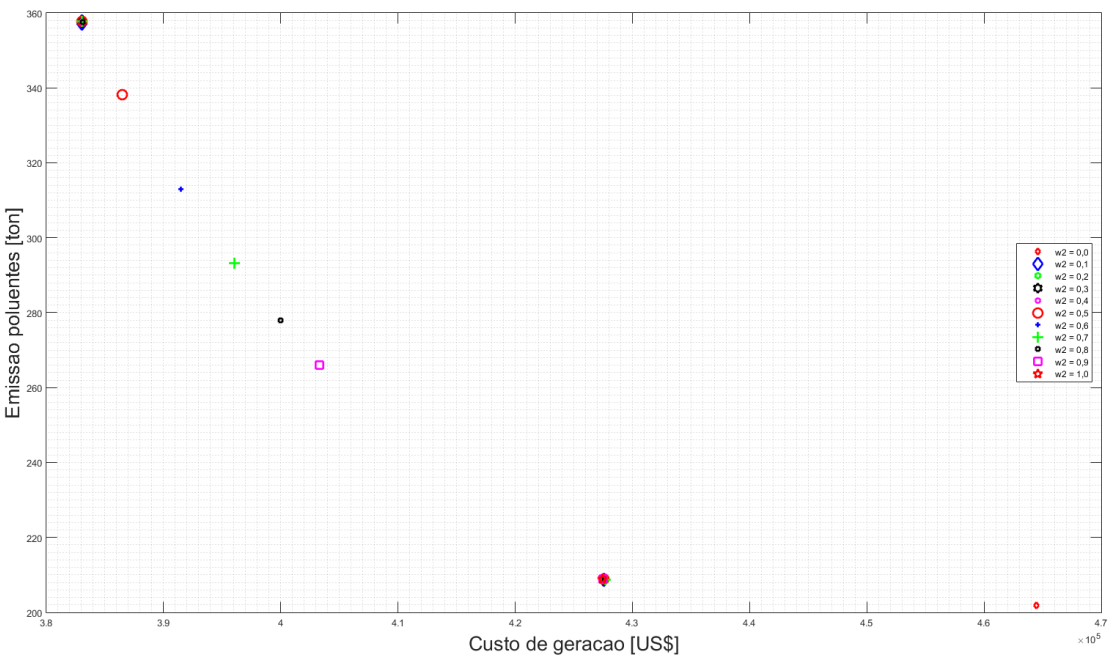
Fonte: Próprio Autor

Figura 45 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E1



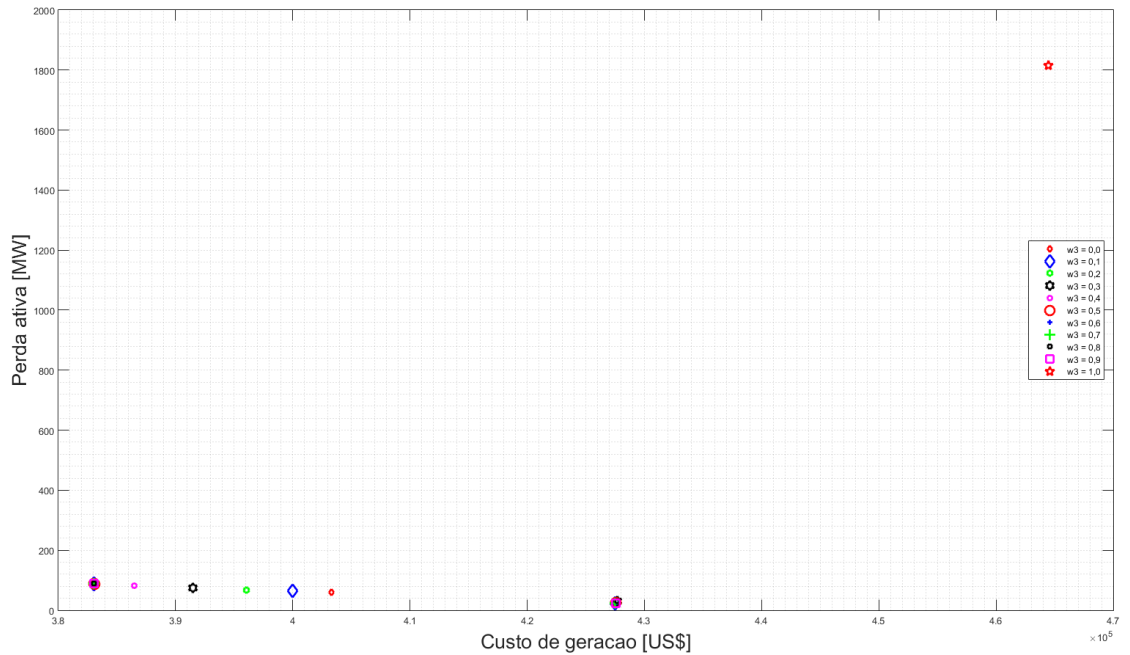
Fonte: Próprio Autor

Figura 46 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E1



Fonte: Próprio Autor

Figura 47 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E1



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (25) verifica-se que o menor valor de custo total de geração de energia para o sistema ACTIVSg200 considerando apenas as gerações termoeletricas é obtido com as ponderações  $w_1 = 0,20$ ,  $w_2 = 0,60$  e  $w_3 = 0,20$ , contudo os valores de perda ativa e emissão de poluentes são elevados.

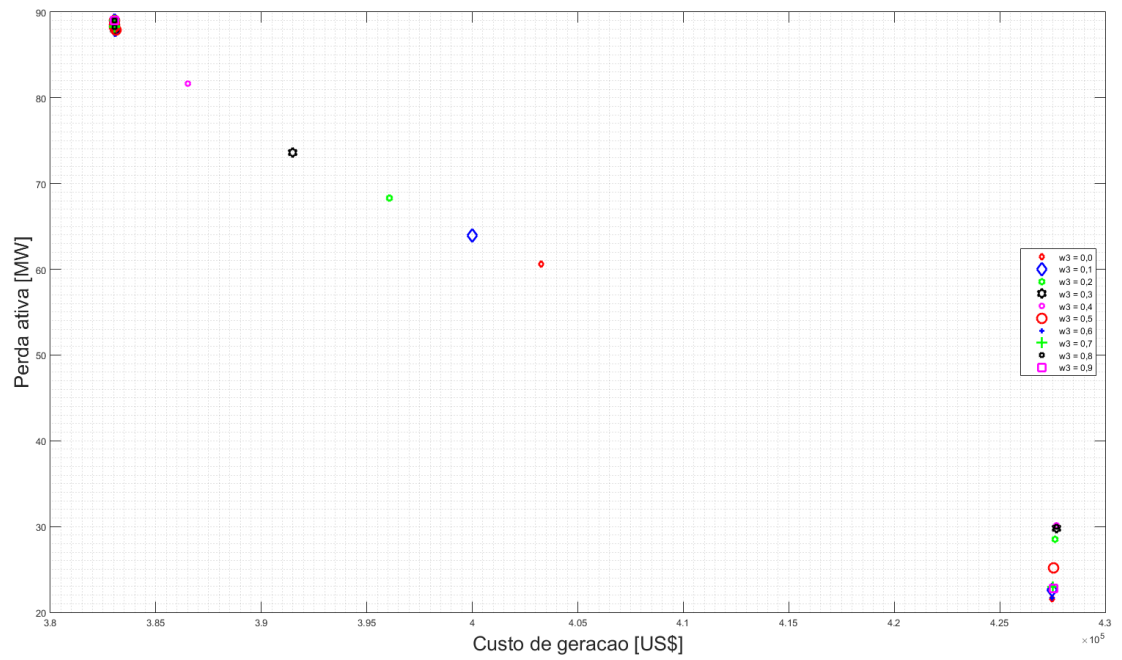
Os resultados da Tabela (25), caso necessário, permitem que o operador do sistema escolha soluções com valores de custo total de geração mais caros, mas com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores.

Na Figura (45) apresenta-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes.

Na Figura (46) ilustra-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração e emissão.

O valor  $w_3 = 1,00$  na Figura (47) não possibilita a análise correta do comportamento das FOs. Sendo assim, na Figura (48) retira-se a simulação da ponderação  $w_3 = 1,00$ , permitindo a análise do comportamento do custo de geração e das perdas ativas quando se fixa a ponderação relativa ao custo de emissão.

Figura 48 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso E1



**Fonte:** Próprio Autor

A Figura (48) apresenta o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração de energia e perda ativa do sistema.

Tabela 27 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3\$_{GerN, Ren}$	$10^3\$_{GerRen}$	$10^3P_a$	$10^3P_r$	$10^2Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>507493348,06</b>	<b>281693,41</b>	<b>91058,56</b>	<b>1122,84</b>	<b>134741,38</b>	<b>162,4859</b>	<b>19,78</b>
0,00	0,10	0,90	346431841,46	234663,65	108645,34	26,02	3122,85	166,6781	51,34
0,00	0,20	0,80	346729909,86	234674,00	108665,37	28,25	3390,54	166,6934	50,84
0,00	0,30	0,70	345624568,73	234465,14	108739,63	20,16	2419,80	166,6944	53,97
0,00	0,40	0,60	345920641,83	234496,35	108748,25	22,30	2676,04	166,6916	52,80
0,00	0,50	0,50	345675927,83	234461,30	108764,02	20,42	2450,60	166,6890	55,70
0,00	0,60	0,40	346858231,49	234699,76	108646,73	29,26	3511,74	166,7083	55,13
0,00	0,70	0,30	346795803,64	234683,51	108646,97	28,88	3465,32	166,7108	56,14
0,00	0,80	0,20	345796047,28	234469,97	108762,27	21,37	2563,81	166,6978	56,50
0,00	0,90	0,10	345954794,53	234482,36	108787,34	22,38	2685,09	166,6893	55,95
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>345895402,74</b>	<b>234469,11</b>	<b>108776,24</b>	<b>22,08</b>	<b>2650,05</b>	<b>166,6968</b>	<b>47,81</b>
0,10	0,00	0,90	331068343,08	191444,56	131653,94	66,42	7969,85	171,8360	77,84
0,10	0,10	0,80	331057087,13	191445,11	131652,48	66,33	7959,50	171,8359	78,45
0,10	0,20	0,70	331197506,16	192552,43	130874,97	64,75	7770,11	171,5540	72,05
0,10	0,30	0,60	331676511,49	195239,13	129003,43	61,95	7433,95	170,9212	75,28
0,10	0,40	0,50	332062503,20	197069,88	127736,58	60,47	7256,04	170,5596	74,22
0,10	0,50	0,40	332724297,13	199524,33	126133,79	58,88	7066,18	170,1759	72,84
0,10	0,60	0,30	333804225,90	203092,62	123951,40	56,34	6760,21	169,7093	70,78
0,10	0,70	0,20	335008202,38	206753,07	121712,61	54,52	6542,52	169,2441	69,64
0,10	0,80	0,10	336205631,25	210172,52	119609,11	53,53	6424,00	168,8312	72,81
0,10	0,90	0,00	337223276,21	213231,96	117735,03	52,14	6256,29	168,4682	72,77
0,20	0,00	0,80	331067023,59	191444,56	131653,81	66,41	7968,66	171,8360	78,98
0,20	0,10	0,70	331067322,80	191444,59	131653,82	66,41	7968,92	171,8360	75,06
0,20	0,20	0,60	331063206,99	191444,82	131653,26	66,38	7965,12	171,8360	73,05
0,20	0,30	0,50	331059311,91	191497,49	131615,28	66,22	7946,54	171,8222	74,47
0,20	0,40	0,40	331182219,61	192552,18	130873,75	64,64	7756,29	171,5541	72,36
0,20	0,50	0,30	331454043,30	194067,72	129817,81	63,07	7568,51	171,1859	75,17
0,20	0,60	0,20	331675608,81	195236,98	129004,89	61,95	7433,74	170,9217	70,20
0,20	0,70	0,10	331877221,98	196220,85	128322,68	61,11	7333,69	170,7199	72,97
0,20	0,80	0,00	332065922,47	197066,06	127739,51	60,50	7260,36	170,5603	73,58
0,30	0,00	0,70	331067468,39	191444,56	131653,85	66,41	7969,06	171,8360	87,09
0,30	0,10	0,60	331066772,33	191444,58	131653,77	66,40	7968,42	171,8360	78,55
0,30	0,20	0,50	331062813,56	191444,72	131653,29	66,37	7964,80	171,8360	73,31
0,30	0,30	0,40	331060870,61	191444,93	131652,96	66,36	7962,98	171,8360	76,39
0,30	0,40	0,30	331063920,30	191445,33	131652,97	66,38	7965,62	171,8358	77,06
0,30	0,50	0,20	331082704,30	191698,96	131473,57	65,92	7910,17	171,7702	73,83
0,30	0,60	0,10	331193041,75	192549,31	130876,79	64,72	7766,94	171,5548	74,47
0,30	0,70	0,00	331361868,89	193617,02	130130,70	63,45	7614,15	171,2928	72,23
0,40	0,00	0,60	331067966,37	191444,56	131653,90	66,41	7969,51	171,8360	87,05
0,40	0,10	0,50	331065967,85	191444,59	131653,69	66,40	7967,69	171,8360	80,02
0,40	0,20	0,40	331066972,34	191444,59	131653,78	66,40	7968,60	171,8360	78,94
0,40	0,30	0,30	331064089,12	191444,71	131653,43	66,38	7965,96	171,8360	70,67
0,40	0,40	0,20	331064417,51	191444,77	131653,42	66,39	7966,23	171,8360	77,75
<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,10</b>	<b>331054642,71</b>	<b>191445,65</b>	<b>131651,87</b>	<b>66,31</b>	<b>7957,12</b>	<b>171,8358</b>	<b>70,83</b>
0,40	0,60	0,00	331056875,94	191497,69	131614,91	66,20	7944,28	171,8222	75,88
0,50	0,00	0,50	331066936,60	191444,56	131653,80	66,40	7968,58	171,8360	82,88
0,50	0,10	0,40	331062575,50	191444,61	131653,34	66,37	7964,62	171,8360	83,52
0,50	0,20	0,30	331065020,20	191444,62	131653,57	66,39	7966,83	171,8360	74,56
0,50	0,30	0,20	331065766,61	191444,63	131653,64	66,40	7967,50	171,8360	74,27
0,50	0,40	0,10	331064211,59	191444,72	131653,43	66,38	7966,06	171,8360	70,25
0,50	0,50	0,00	331065091,43	191444,73	131653,50	66,39	7966,85	171,8360	72,97
0,60	0,00	0,40	331068436,01	191444,56	131653,95	66,42	7969,93	171,8360	86,66
0,60	0,10	0,30	331063802,95	191444,60	131653,47	66,38	7965,74	171,8360	82,33
0,60	0,20	0,20	331063137,56	191444,63	131653,38	66,38	7965,12	171,8360	77,06
0,60	0,30	0,10	331061387,63	191444,71	131653,17	66,36	7963,52	171,8360	77,89
0,60	0,40	0,00	331061162,80	191444,77	131653,10	66,36	7963,29	171,8360	79,31
0,70	0,00	0,30	331068393,28	191444,56	131653,94	66,42	7969,90	171,8360	77,59
0,70	0,10	0,20	331065099,00	191444,58	131653,61	66,39	7966,91	171,8360	90,05
0,70	0,20	0,10	331060809,19	191444,65	131653,14	66,36	7963,01	171,8360	77,48
0,70	0,30	0,00	331067465,78	191444,58	131653,84	66,41	7969,05	171,8360	79,22
0,80	0,00	0,20	331067840,39	191444,56	131653,89	66,41	7969,40	171,8360	81,61
0,80	0,10	0,10	331067960,38	191444,56	131653,90	66,41	7969,50	171,8360	79,25
0,80	0,20	0,00	331065734,39	191444,59	131653,66	66,40	7967,48	171,8360	82,34
0,90	0,00	0,10	331067322,48	191444,56	131653,84	66,41	7968,93	171,8360	79,81
0,90	0,10	0,00	331067742,80	191444,56	131653,88	66,41	7969,31	171,8360	85,58
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>331068359,92</b>	<b>191444,56</b>	<b>131653,94</b>	<b>66,42</b>	<b>7969,86</b>	<b>171,8360</b>	<b>86,19</b>

Fonte: Próprio Autor

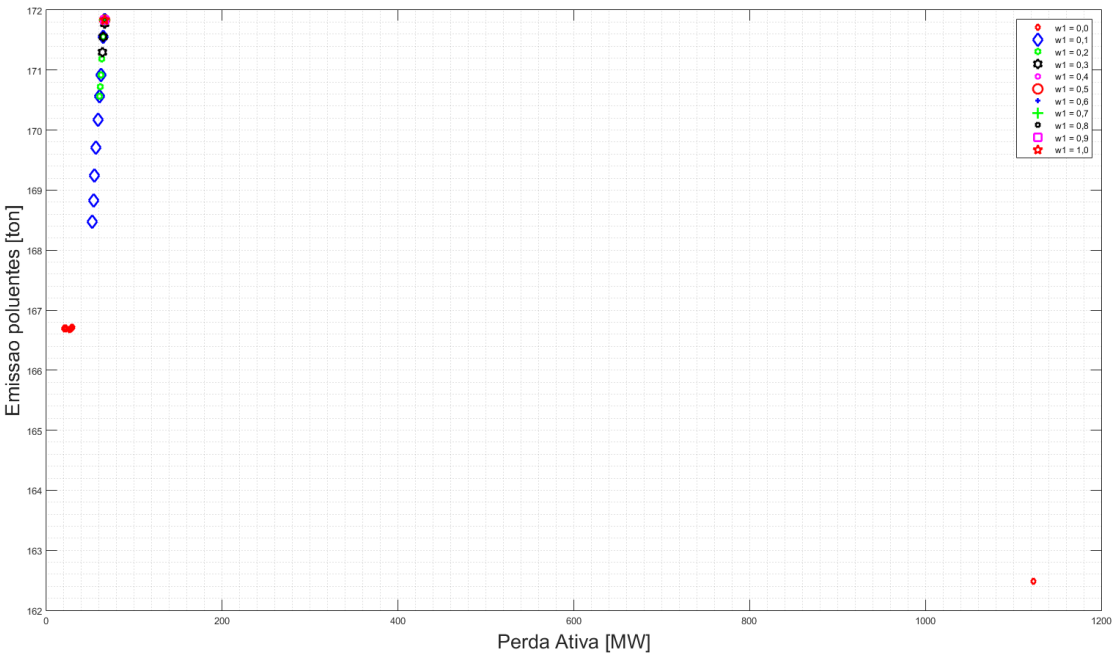


Tabela 28 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E2

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	281693411,28	91058556,37	0,00	0,00
0,00	0,10	0,90	234663649,51	108645341,70	0,00	0,00
0,00	0,20	0,80	234674000,94	108665372,95	0,00	0,00
0,00	0,30	0,70	234465137,11	108739634,84	0,00	0,00
0,00	0,40	0,60	234496352,82	108748248,11	0,00	0,00
0,00	0,50	0,50	234461303,47	108764024,13	0,00	0,00
0,00	0,60	0,40	234699756,67	108646730,73	0,00	0,00
0,00	0,70	0,30	234683511,35	108646968,22	0,00	0,00
0,00	0,80	0,20	234469968,71	108762268,61	0,00	0,00
0,00	0,90	0,10	234482364,19	108787342,66	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	234469110,35	108776239,35	0,00	0,00
0,10	0,00	0,90	191444556,30	131653937,10	0,00	0,00
0,10	0,10	0,80	191445106,07	131652481,26	0,00	0,00
0,10	0,20	0,70	192552427,26	130874972,93	0,00	0,00
0,10	0,30	0,60	195239132,57	129003432,42	0,00	0,00
0,10	0,40	0,50	197069876,68	127736582,66	0,00	0,00
0,10	0,50	0,40	199524329,73	126133785,30	0,00	0,00
0,10	0,60	0,30	203092616,77	123951400,23	0,00	0,00
0,10	0,70	0,20	206753065,16	121712614,07	0,00	0,00
0,10	0,80	0,10	210172518,12	119609112,85	0,00	0,00
0,10	0,90	0,00	213231959,08	117735027,64	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	191444560,37	131653806,62	0,00	0,00
0,20	0,10	0,70	191444587,29	131653817,92	0,00	0,00
0,20	0,20	0,60	191444822,15	131653262,77	0,00	0,00
0,20	0,30	0,50	191497493,43	131615278,37	0,00	0,00
0,20	0,40	0,40	192552177,80	130873750,43	0,00	0,00
0,20	0,50	0,30	194067721,68	129817807,70	0,00	0,00
0,20	0,60	0,20	195236977,42	129004889,66	0,00	0,00
0,20	0,70	0,10	196220853,74	128322678,16	0,00	0,00
0,20	0,80	0,00	197066060,04	127739505,60	0,00	0,00
0,30	0,00	0,70	191444558,99	131653850,61	0,00	0,00
0,30	0,10	0,60	191444584,57	131653766,45	0,00	0,00
0,30	0,20	0,50	191444721,50	131653292,69	0,00	0,00
0,30	0,30	0,40	191444929,85	131652964,85	0,00	0,00
0,30	0,40	0,30	191445329,34	131652972,24	0,00	0,00
0,30	0,50	0,20	191698959,98	131473571,18	0,00	0,00
0,30	0,60	0,10	192549311,60	130876787,55	0,00	0,00
0,30	0,70	0,00	193617022,31	130130696,22	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	191444557,46	131653899,85	0,00	0,00
0,40	0,10	0,50	191444587,05	131653686,91	0,00	0,00
0,40	0,20	0,40	191444594,30	131653779,37	0,00	0,00
0,40	0,30	0,30	191444706,64	131653425,80	0,00	0,00
0,40	0,40	0,20	191444765,58	131653417,68	0,00	0,00
0,40	0,50	0,10	191445649,64	131651870,96	0,00	0,00
0,40	0,60	0,00	191497686,79	131614913,33	0,00	0,00
0,50	0,00	0,50	191444560,63	131653798,02	0,00	0,00
0,50	0,10	0,40	191444613,30	131653341,17	0,00	0,00
0,50	0,20	0,30	191444618,26	131653574,62	0,00	0,00
0,50	0,30	0,20	191444631,83	131653637,87	0,00	0,00
0,50	0,40	0,10	191444715,07	131653432,01	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	191444734,95	131653503,31	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	191444556,02	131653946,28	0,00	0,00
0,60	0,10	0,30	191444596,57	131653471,01	0,00	0,00
0,60	0,20	0,20	191444634,40	131653381,70	0,00	0,00
0,60	0,30	0,10	191444705,69	131653165,28	0,00	0,00
0,60	0,40	0,00	191444766,20	131653103,35	0,00	0,00
0,70	0,00	0,30	191444556,15	131653942,06	0,00	0,00
0,70	0,10	0,20	191444582,98	131653605,42	0,00	0,00
0,70	0,20	0,10	191444652,85	131653144,17	0,00	0,00
0,70	0,30	0,00	191444580,28	131653836,39	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	191444557,85	131653887,39	0,00	0,00
0,80	0,10	0,10	191444561,28	131653896,77	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	191444589,55	131653662,57	0,00	0,00
0,90	0,00	0,10	191444559,44	131653836,17	0,00	0,00
0,90	0,10	0,00	191444562,23	131653875,07	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	191444556,25	131653938,76	0,00	0,00

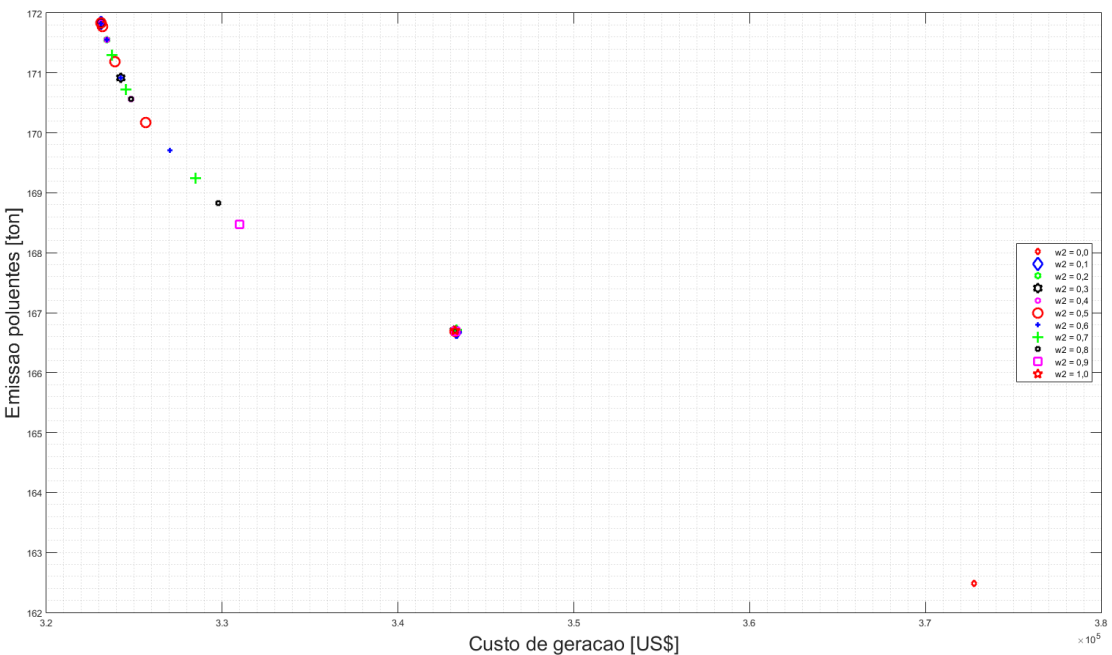
Fonte: Próprio Autor

Figura 49 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E2



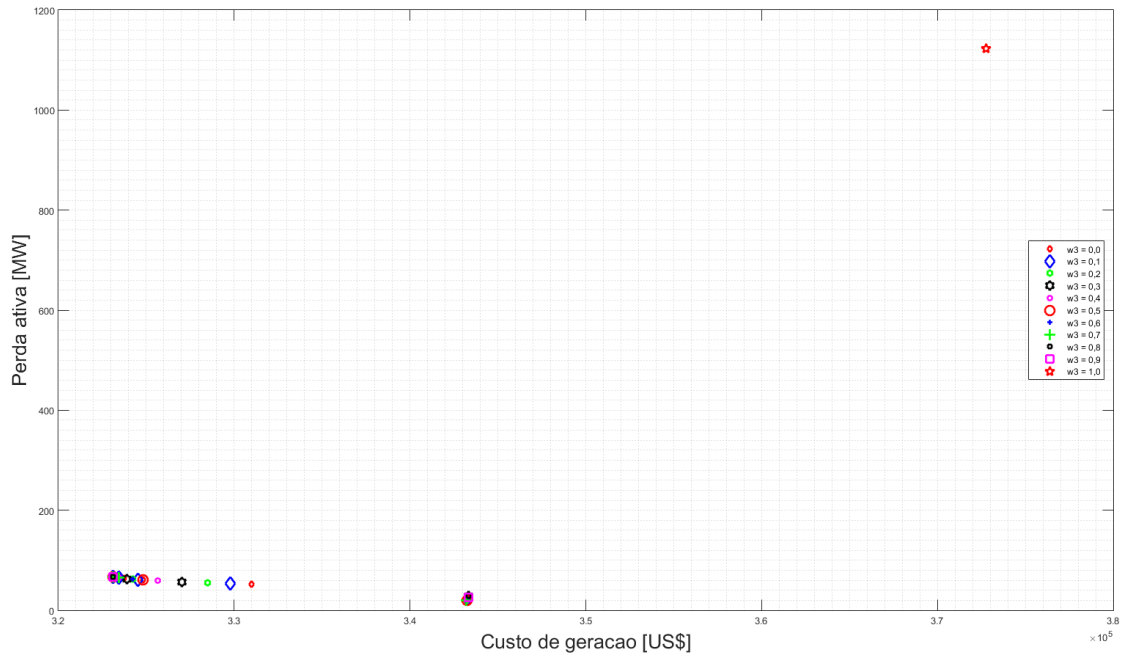
Fonte: Próprio Autor

Figura 50 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E2



Fonte: Próprio Autor

Figura 51 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E2



**Fonte:** Próprio Autor

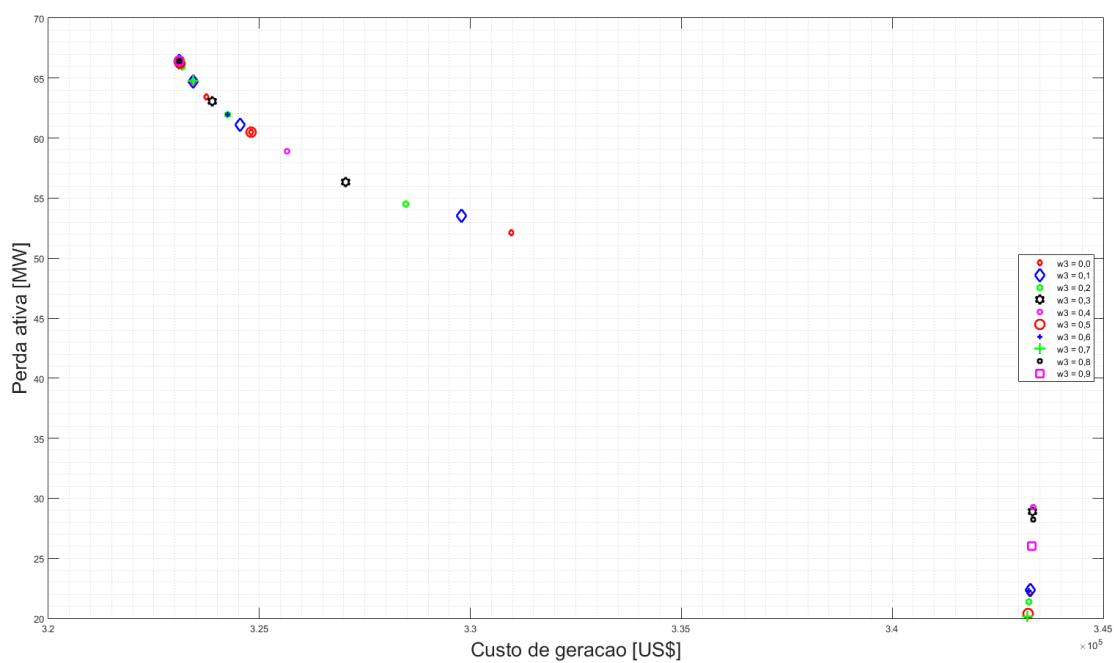
Na Tabela (27) verifica-se que o menor valor de custo total de geração de energia considerando as gerações termoeletrica e hidroeletrica é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,40$ ,  $w_2 = 0,50$  e  $w_3 = 0,10$  com valores de perda ativa e emissão de poluentes altos. O conjunto de soluções da Tabela (27), caso necessário, permite que o operador do sistema selecione soluções alternativas com valores de custo total de geração maiores e valores de perda ativa e emissão de poluentes menores.

Comparando os resultados das Tabelas (27) e (25) verifica-se a redução nos valores de emissão de poluentes e custo total de geração de energia e aumento nos valores de perda ativa. Analisando as Tabelas (28) e (26) observa-se a redução dos custos de geração das gerações termoeletricas, visto que os custos de geração das unidades hidroeletricas são menores em relação aos custos de geração das unidades termoeletricas.

Nas Figuras (49) e (50) apresentam-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes e o comportamento conflitante entre os valores de custos de geração e emissão de poluentes, respectivamente.

O fator de ponderação  $w_3 = 1,00$  da Figura (51) não permite a análise correta do comportamento das FOs de custo de geração e perdas ativas. Desta forma, na Figura (52) apresentam-se os resultados sem a ponderação  $w_3 = 1,00$  permitindo a análise do comportamento destes dois termos da FO.

Figura 52 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso E2



**Fonte:** Próprio Autor

A Figura (52) apresenta o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração de energia e perda ativa do sistema.

Tabela 29 – Sistema ACTIVSg200 - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{total}$	$10^3\$_{GerN\_Ren}$	$10^3\$_{GerRen}$	$10^3P_a$	$10^3P_r$	$10^2Em [ton]$	Tempo [seg]
<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>466649478,06</b>	<b>184910,35</b>	<b>159482,90</b>	<b>1018,80</b>	<b>29,44</b>	<b>132,3606</b>	<b>13,73</b>
0,00	0,10	0,90	326964026,86	174504,66	149831,97	21,89	-6,58	134,0012	57,98
0,00	0,20	0,80	328113153,96	174735,92	149760,84	30,14	-6,57	134,0012	54,36
0,00	0,30	0,70	327000634,75	174449,91	149905,93	22,04	-6,59	134,0188	57,42
0,00	0,40	0,60	326916150,27	174431,49	149913,26	21,43	-6,59	134,0207	54,73
0,00	0,50	0,50	327463622,60	174600,92	149796,62	25,55	-6,55	134,0099	58,14
0,00	0,60	0,40	326954556,64	174459,26	149890,48	21,71	-6,57	134,0191	56,03
0,00	0,70	0,30	327075626,19	174465,64	149886,24	22,70	-6,58	134,0199	57,69
0,00	0,80	0,20	327326152,43	174549,61	149833,27	24,53	-6,55	134,0151	58,44
0,00	0,90	0,10	327021219,58	174448,24	149902,72	22,25	-6,58	134,0218	58,88
<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>327935146,79</b>	<b>174691,61</b>	<b>149779,18</b>	<b>28,87</b>	<b>-6,56</b>	<b>134,0103</b>	<b>51,06</b>
0,10	0,00	0,90	299910352,18	142515,63	147528,24	82,22	-4,88	137,4171	76,73
0,10	0,10	0,80	299904041,57	142516,01	147527,44	82,17	-4,88	137,4170	78,78
0,10	0,20	0,70	300210659,82	145087,68	145721,23	78,35	-5,08	136,7766	72,02
0,10	0,30	0,60	301118489,63	148342,31	144036,57	72,83	-5,32	136,1836	69,20
0,10	0,40	0,50	302361703,13	150355,19	143766,55	68,67	-5,54	135,8894	74,66
0,10	0,50	0,40	304460174,03	153463,80	143317,35	63,99	-5,76	135,5045	76,70
0,10	0,60	0,30	306478462,90	156868,52	142385,51	60,20	-5,95	135,1184	81,05
0,10	0,70	0,20	308180227,48	159786,61	141497,34	57,47	-6,08	134,7987	75,03
0,10	0,80	0,10	309537112,88	162180,67	140724,96	55,26	-6,16	134,5423	74,39
0,10	0,90	0,00	310731251,82	164351,92	139940,42	53,66	-6,23	134,3070	72,31
0,20	0,00	0,80	299907989,11	142515,64	147528,01	82,20	-4,88	137,4171	84,03
0,20	0,10	0,70	299908007,19	142515,69	147527,99	82,20	-4,88	137,4171	76,97
0,20	0,20	0,60	299906438,96	142515,89	147527,74	82,19	-4,88	137,4171	76,48
0,20	0,30	0,50	299917491,83	142975,08	147201,28	81,18	-4,95	137,2897	72,73
0,20	0,40	0,40	300183653,39	145085,55	145722,06	78,13	-5,08	136,7772	73,13
0,20	0,50	0,30	300606821,89	147063,10	144488,13	75,46	-5,21	136,3875	75,02
0,20	0,60	0,20	301112274,68	148337,10	144041,72	72,78	-5,32	136,1845	73,39
0,20	0,70	0,10	301614174,69	149328,54	143780,49	70,88	-5,42	136,0297	70,06
0,20	0,80	0,00	302387052,81	150346,24	143769,55	68,93	-5,54	135,8906	76,88
0,30	0,00	0,70	299907658,93	142515,64	147527,98	82,20	-4,88	137,4171	78,17
0,30	0,10	0,60	299906240,97	142515,69	147527,82	82,19	-4,88	137,4171	83,17
0,30	0,20	0,50	299906647,36	142515,75	147527,83	82,19	-4,88	137,4171	74,69
0,30	0,30	0,40	299902172,72	142516,10	147527,22	82,16	-4,88	137,4170	77,98
0,30	0,40	0,30	299912379,84	142643,72	147437,01	81,93	-4,92	137,3813	76,19
0,30	0,50	0,20	299983128,28	143578,35	146776,84	80,23	-4,99	137,1288	73,23
0,30	0,60	0,10	300182423,08	145084,30	145722,88	78,13	-5,08	136,7775	74,11
0,30	0,70	0,00	300430274,59	146445,43	144805,62	76,49	-5,17	136,5008	71,55
0,40	0,00	0,60	299906723,95	142515,64	147527,89	82,19	-4,88	137,4171	79,41
0,40	0,10	0,50	299903609,29	142515,70	147527,56	82,17	-4,88	137,4171	77,08
0,40	0,20	0,40	299907284,59	142515,70	147527,92	82,20	-4,88	137,4171	74,38
0,40	0,30	0,30	299903287,31	142515,86	147527,46	82,17	-4,88	137,4171	74,25
<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,20</b>	<b>299891158,00</b>	<b>142516,63</b>	<b>147525,89</b>	<b>82,07</b>	<b>-4,88</b>	<b>137,4169</b>	<b>74,36</b>
0,40	0,50	0,10	299903742,69	142567,94	147490,38	82,05	-4,90	137,4025	73,16
0,40	0,60	0,00	299937248,01	142972,07	147204,88	81,34	-4,95	137,2904	78,92
0,50	0,00	0,50	299906614,04	142515,64	147527,88	82,19	-4,88	137,4171	82,44
0,50	0,10	0,40	299907127,66	142515,66	147527,92	82,20	-4,88	137,4171	81,89
0,50	0,20	0,30	299905601,16	142515,71	147527,75	82,18	-4,88	137,4171	78,61
0,50	0,30	0,20	299902500,54	142515,82	147527,40	82,16	-4,88	137,4171	76,33
0,50	0,40	0,10	299906634,11	142515,78	147527,81	82,19	-4,88	137,4171	75,25
0,50	0,50	0,00	299900771,97	142516,17	147527,05	82,15	-4,88	137,4170	80,23
0,60	0,00	0,40	299907835,04	142515,64	147528,00	82,20	-4,88	137,4171	80,19
0,60	0,10	0,30	299906074,85	142515,67	147527,81	82,19	-4,88	137,4171	77,92
0,60	0,20	0,20	299906232,42	142515,69	147527,82	82,19	-4,88	137,4171	75,17
0,60	0,30	0,10	299906114,98	142515,72	147527,79	82,19	-4,88	137,4171	75,61
0,60	0,40	0,00	299899069,24	142515,92	147527,02	82,13	-4,88	137,4171	78,67
0,70	0,00	0,30	299908825,35	142515,64	147528,09	82,21	-4,88	137,4171	83,06
0,70	0,10	0,20	299910407,44	142515,64	147528,25	82,22	-4,88	137,4171	85,72
0,70	0,20	0,10	299903327,57	142515,71	147527,53	82,17	-4,88	137,4171	81,30
0,70	0,30	0,00	299904533,42	142515,73	147527,64	82,18	-4,88	137,4171	75,94
0,80	0,00	0,20	299907395,88	142515,64	147527,95	82,20	-4,88	137,4171	81,80
0,80	0,10	0,10	299910514,22	142515,64	147528,26	82,22	-4,88	137,4171	79,27
0,80	0,20	0,00	299905068,49	142515,69	147527,71	82,18	-4,88	137,4171	81,47
0,90	0,00	0,10	299910241,05	142515,64	147528,23	82,22	-4,88	137,4171	84,36
0,90	0,10	0,00	299907515,70	142515,65	147527,96	82,20	-4,88	137,4171	80,86
<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>299910661,61</b>	<b>142515,63</b>	<b>147528,27</b>	<b>82,22</b>	<b>-4,88</b>	<b>137,4171</b>	<b>81,67</b>

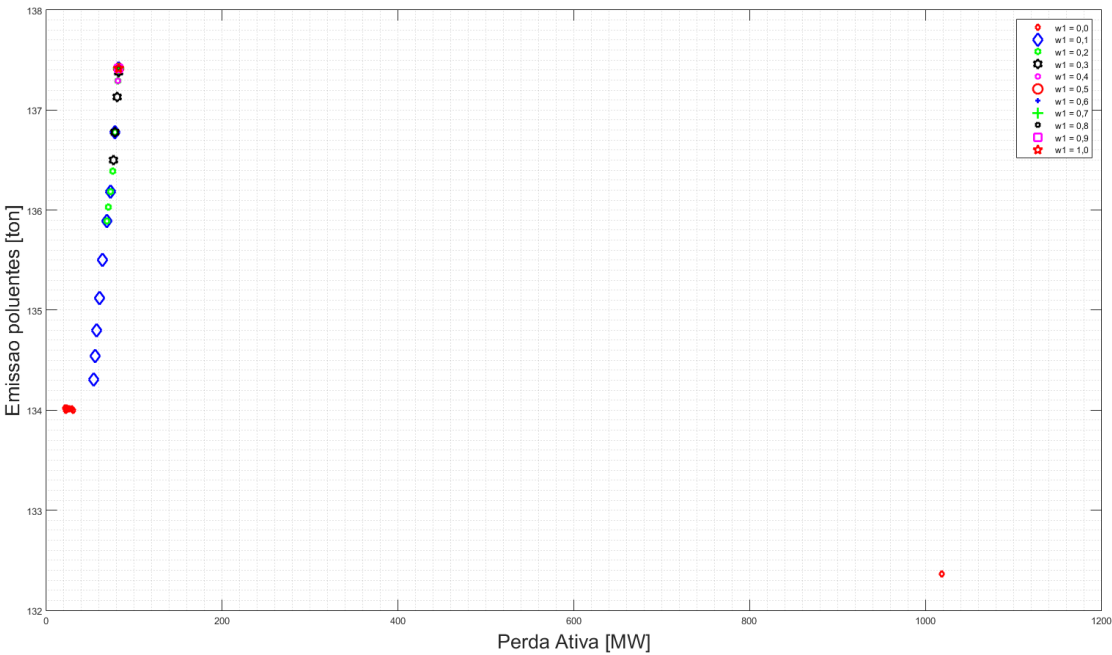
Fonte: Próprio Autor

Tabela 30 – Sistema ACTIVSg200 - Custos individuais de geração - Caso E3

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\$_{Termo}$	$\$_{Hidro}$	$\$_{Eolica}$	$\$_{Foto}$
0,00	0,00	1,00	184910354,85	123219332,67	20082024,07	16181541,74
0,00	0,10	0,90	174504657,60	118786470,35	18081085,18	12964414,08
0,00	0,20	0,80	174735923,20	118679396,79	18105772,89	12975673,25
0,00	0,30	0,70	174449913,25	118782060,91	18127871,23	12996000,52
0,00	0,40	0,60	174431493,24	118793245,01	18120072,98	12999938,62
0,00	0,50	0,50	174600919,85	118791240,76	18054723,00	12950661,23
0,00	0,60	0,40	174459257,47	118815070,86	18078849,67	12996556,88
0,00	0,70	0,30	174465641,72	118812735,68	18109380,57	12964121,97
0,00	0,80	0,20	174549609,47	118807306,57	18071114,91	12954848,19
0,00	0,90	0,10	174448239,01	118810480,01	18115933,58	12976310,74
0,00	1,00	0,00	174691613,53	118737767,58	18073680,94	12967733,03
0,10	0,00	0,90	142515634,92	145986480,65	840961,08	700800,41
0,10	0,10	0,80	142516007,16	145985516,32	841096,24	700832,26
0,10	0,20	0,70	145087678,46	144175419,08	844920,45	700889,24
0,10	0,30	0,60	148342305,17	140750719,92	2584451,71	701400,13
0,10	0,40	0,50	150355187,93	137322457,18	5742336,99	701753,12
0,10	0,50	0,40	153463799,69	133043540,53	9572594,59	701218,53
0,10	0,60	0,30	156868523,90	129578534,78	12105585,83	701392,01
0,10	0,70	0,20	159786612,01	127014513,80	13780766,26	702064,37
0,10	0,80	0,10	162180672,80	124966639,56	15053831,64	704487,72
0,10	0,90	0,00	164351922,39	123240002,76	15993854,18	706566,85
0,20	0,00	0,80	142515640,43	145986246,34	840962,99	700801,14
0,20	0,10	0,70	142515691,52	145986197,34	840985,45	700807,76
0,20	0,20	0,60	142515888,83	145985860,66	841053,54	700822,15
0,20	0,30	0,50	142975076,56	145657876,28	842402,40	701002,62
0,20	0,40	0,40	145085551,49	144170915,78	850003,86	701141,71
0,20	0,50	0,30	147063102,07	142503935,68	1283065,30	701129,08
0,20	0,60	0,20	148337099,40	140749831,76	2590393,04	701495,93
0,20	0,70	0,10	149328537,95	139245165,81	3833624,85	701700,27
0,20	0,80	0,00	150346235,43	137337339,55	5731082,83	701126,38
0,30	0,00	0,70	142515641,19	145986213,61	840963,26	700801,24
0,30	0,10	0,60	142515690,76	145986027,05	840984,81	700808,05
0,30	0,20	0,50	142515747,90	145986010,02	841009,27	700814,00
0,30	0,30	0,40	142516096,19	145985250,11	841129,73	700840,18
0,30	0,40	0,30	142643722,61	145894980,25	841187,64	700840,35
0,30	0,50	0,20	143578351,17	145232658,90	843148,33	701037,04
0,30	0,60	0,10	145084300,65	144171615,39	850117,06	701152,10
0,30	0,70	0,00	146445430,40	143157857,33	946653,39	701108,85
0,40	0,00	0,60	142515643,37	145986120,89	840964,02	700801,53
0,40	0,10	0,50	142515700,13	145985762,94	840988,33	700809,46
0,40	0,20	0,40	142515703,35	145986115,60	840990,52	700809,30
0,40	0,30	0,30	142515859,57	145985574,54	841056,06	700826,24
0,40	0,40	0,20	142516630,47	145983673,65	841327,87	700886,96
0,40	0,50	0,10	142567938,17	145948267,68	841251,24	700856,41
0,40	0,60	0,00	142972073,26	145662556,32	841452,11	700868,74
0,50	0,00	0,50	142515643,67	145986109,98	840964,12	700801,57
0,50	0,10	0,40	142515664,27	145986139,25	840973,28	700804,51
0,50	0,20	0,30	142515710,05	145985945,92	840993,13	700810,49
0,50	0,30	0,20	142515816,31	145985540,26	841038,75	700823,05
0,50	0,40	0,10	142515784,54	145985973,53	841023,35	700816,87
0,50	0,50	0,00	142516169,13	145985045,90	841155,18	700846,21
0,60	0,00	0,40	142515640,78	145986231,06	840963,12	700801,19
0,60	0,10	0,30	142515667,09	145986034,54	840974,28	700804,91
0,60	0,20	0,20	142515690,96	145986026,03	840984,87	700808,07
0,60	0,30	0,10	142515722,32	145985983,48	840998,64	700811,78
0,60	0,40	0,00	142515921,07	145985104,31	841083,29	700835,02
0,70	0,00	0,30	142515638,47	145986329,27	840962,31	700800,88
0,70	0,10	0,20	142515639,05	145986481,91	840962,90	700801,01
0,70	0,20	0,10	142515710,85	145985724,99	840993,03	700810,89
0,70	0,30	0,00	142515730,44	145985822,22	841001,86	700813,12
0,80	0,00	0,20	142515641,82	145986187,52	840963,48	700801,32
0,80	0,10	0,10	142515637,93	145986493,37	840962,43	700800,85
0,80	0,20	0,00	142515687,81	145985916,48	840983,23	700807,76
0,90	0,00	0,10	142515635,18	145986469,64	840961,17	700800,44
0,90	0,10	0,00	142515652,23	145986188,80	840968,05	700802,83
1,00	0,00	0,00	142515634,19	145986511,34	840960,83	700800,31

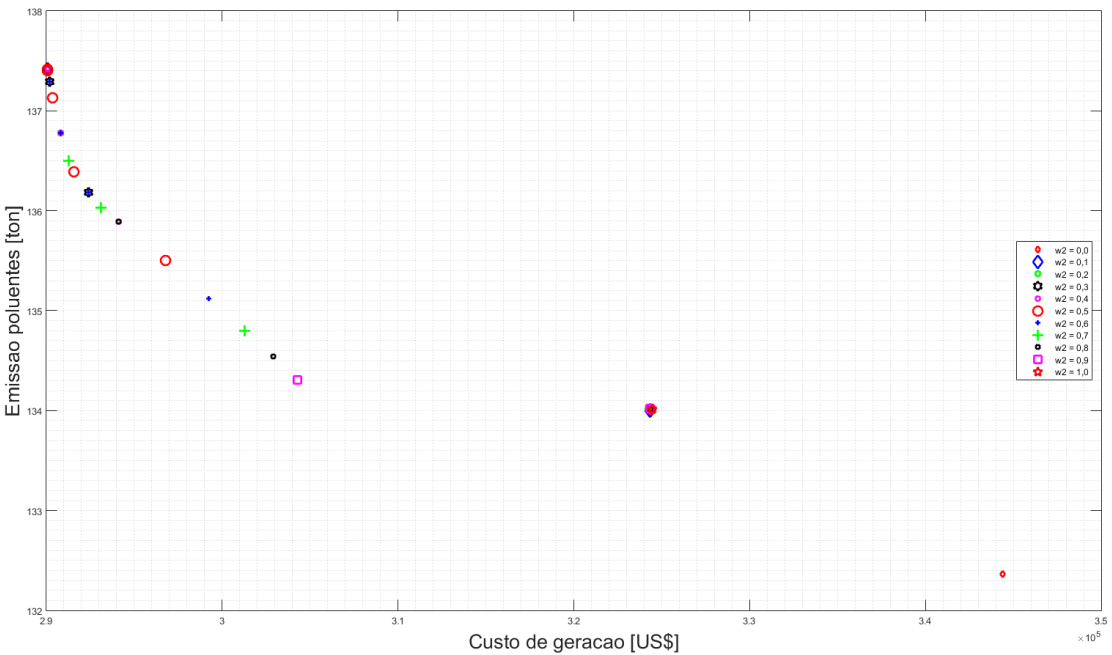
Fonte: Próprio Autor

Figura 53 – Sistema ACTIVSg200 - Perda ativa vs. Emissão de poluentes - Caso E3



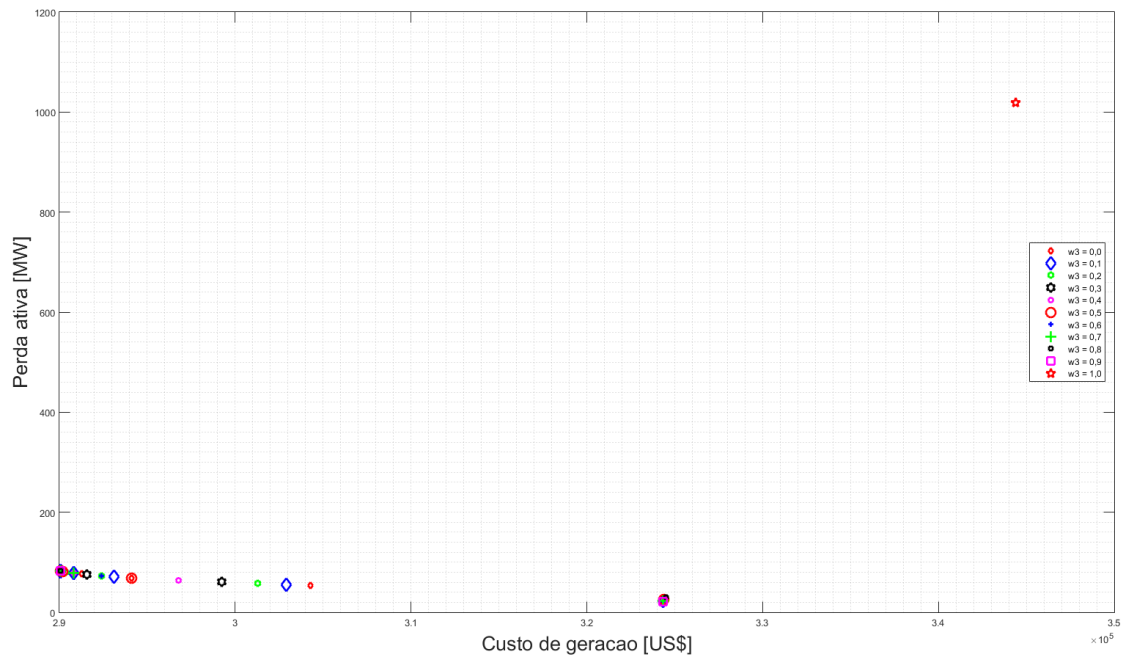
Fonte: Próprio Autor

Figura 54 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Emissão de poluentes - Caso E3



Fonte: Próprio Autor

Figura 55 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa - Caso E3



**Fonte:** Próprio Autor

Na Tabela (29) verifica-se que o menor valor de custo total para o sistema ACTIVSg200 adotando os geradores que utilizam fontes renováveis e não renováveis é obtido para as ponderações  $w_1 = 0,40$ ,  $w_2 = 0,40$  e  $w_3 = 0,20$ , porém os valores de perda ativa e emissão de poluentes são elevados.

Analisando os resultados fornecidos nas Tabelas (27) e (29) verifica-se a redução dos valores de emissão de poluentes e dos custos totais de geração de energia.

Comparando os resultados das Tabelas (29) e (27) verifica-se uma redução nos valores de custo total de geração de energia e emissão de poluentes, contudo, também se observa o aumento nos valores de perda ativa do sistema. Na Tabela (30) verifica-se a redução dos custos de geração das gerações termoeletricas em relação à Tabela (28), porque os custos das gerações renováveis são menores em relação aos custos das gerações termoeletricas, e não apresentam emissão de poluentes ao meio ambiente.

O conjunto de soluções da Tabela (29), caso necessário, possibilita que o operador do sistema selecione soluções com valor de custo de geração de energia maiores, no entanto, com valores de perda ativa e emissão de poluentes menores em relação à solução com menor custo total de geração.

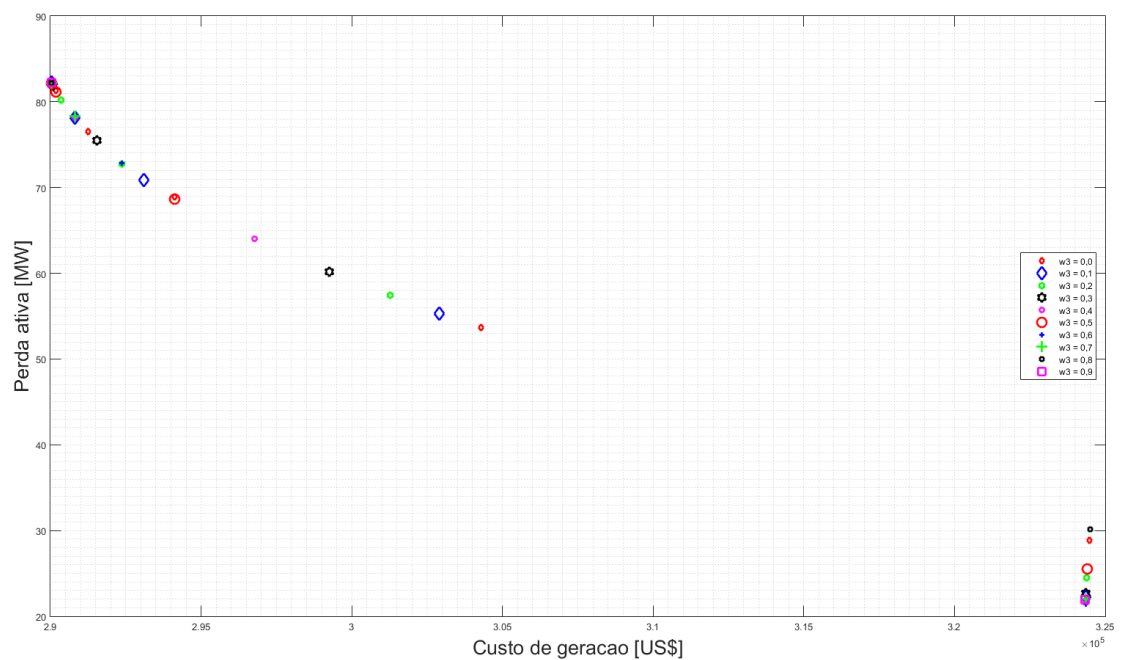
Nas Figuras (53) e (54) ilustram-se o comportamento não conflitante dos valores de perda ativa e emissão de poluentes e o comportamento conflitante entre os valores dos



custo de geração e emissão de poluentes, respectivamente.

O fator de ponderação de  $w_3 = 1,00$  na Figura (55) não permite verificar o comportamento das FOs de custo de geração e das perdas ativas. Logo, a Figura (56) sem considerar a ponderação  $w_3 = 1,00$ , permitindo a análise do comportamento do custo de geração e das perdas ativas quando se fixa a ponderação relativa ao custo de emissão de poluentes.

Figura 56 – Sistema ACTIVSg200 - Custo de geração vs. Perda ativa sem  $w_3 = 1,00$  - Caso E3



**Fonte:** Próprio Autor

Na Figura (56) verifica-se o comportamento conflitante entre os valores de custo de geração de energia e perda ativa.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho são propostos os modelos matemáticos multiobjetivo determinístico e estocástico de programação cônica de segunda ordem em coordenadas retangulares, baseados em outros trabalhos da literatura, para a resolução do problema de fluxo de potência ótimo de geração e controle de potência reativa em sistemas elétricos considerando a natureza aleatória das fontes de geração renováveis e da demanda do SEP.

No modelo determinístico considera-se a relação de tensão dos transformadores como variável de controle de tensão, similar à adotada pelo *software* MATPOWER®. Comparando os resultados obtidos pelos modelos determinístico mono-objetivo e os fornecidos pelo *software* MATPOWER®, pode-se concluir que o modelo determinístico apresenta resultados satisfatórios e de boa qualidade.

Com as demais funções objetivos do modelo, observou-se que os menores valores do custo de geração de energia elétrica são obtidos quando os custos de perda ativa e valores de emissão de poluentes são maiores. Portanto, o operador do sistema elétrico pode optar em escolher outros valores de ponderações para as funções objetivo com custo de geração de energia mais caros, no entanto, com valores de perda ativa e emissão de poluente menores.

No modelo estocástico multiobjetivo adota-se a relação de transformação dos transformadores como variável de controle de tensão, e os níveis de demanda da carga, velocidade do vento e irradiação solar são obtidos através da estratégia de redução de cenários por blocos de tempo.

Através das análises do capítulo 6, conclui-se que ao alterar a matriz energética com a instalação de fontes de gerações renováveis no sistema elétrico reduzem-se os valores de emissão de poluentes e o custo total de geração, mas aumentam-se os custos de perda ativa, pois as gerações eólica e fotovoltaicas possuem custos menores de geração e de emissão, sendo dependentes da aleatoriedade das condições climáticas (fontes não despacháveis).

Para trabalhos futuros propõe-se:

- Introdução do controle de chaveamentos para os bancos de capacitores e reatores *shunts*;
- Desenvolvimento de uma modelagem considerando os *taps* dos transformadores como variáveis discretas;
- Introduzir nos modelos matemáticos as restrições referentes às curvas de capacidade térmica dos geradores;

- 
- Desenvolver um algoritmo de FPO com despacho econômico e ambiental que considere o sistema composto por vários subsistemas interligados;
  - Determinar e mapear as pegadas de carbono no sistema de transmissão e geração;
  - Analisar e propor no problema de FPO o planejamento de reativos de curto prazo.

## REFERÊNCIAS

- ABIDO, M. A. Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 18, n. 3, p. 1529 – 1537, 2003.
- ACHA, E.; AMBRIZ-PEREZ, H.; FUERTE-ESQUIVEL, C. Advanced transformer control modeling in an optimal power flow using newton's method. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 290–298, 2000.
- ALSAC, O.; STOTT, B. Optimal load flow with steady-state security. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, n. 3, p. 745–751, 1974.
- ARAUJO, E. X. S. *Fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos de potência através de um algoritmo genético multiobjetivo*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira., 2018. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153015/araujo\\_exs\\_dr\\_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153015/araujo_exs_dr_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y)>.
- AZEVEDO, A. T. et al. How to efficiently incorporate facts devices in optimal active power flow model. *Journal of Industrial and Management Optimization*, Springfield, v. 6, n. 2, p. 315 – 331, 2010. Acesso em: 11 set. 2019. Disponível em: <<https://www.ime.unicamp.br/~aurelio/artigos/jimo.pdf>>.
- BARINGO, L.; CONEJO, A. Correlated wind-power production and electric load scenarios for investment decisions. *Applied Energy*, Oxford, v. 101, p. 475–482, 2013.
- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. Nonlinear programming: theory and algorithms. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- BILLINTON, R.; SACHDEVA, S. Optimal real and reactive power operation in a hydrothermal system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 91, n. 4, p. 1405–1411, 1972.
- BIRCHFIELD, A. B. et al. Grid structural characteristics as validation criteria for synthetic networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 32, n. 4, p. 3258–3265, 2016.
- BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. Convex optimization. Cambridge, 2004.
- BURCHETT, R.; HAPP, H.; VIERATH, D. Quadratically convergent optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 103, n. 11, p. 3267–3275, 1984.
- BURCHETT, R.; HAPP, H.; WIRGAU, K. Large scale optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 101, n. 10, p. 3722–3732, 1982.
- BURCHETT, R. et al. Developments in optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 101, n. 2, p. 406–414, 1982.

- CALOVIC, M. S. Modeling and analysis of under-load tap-changing transformer control systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 103, n. 7, p. 1909–1915, 1984.
- CARPENTIER, J. Contribution to the economic dispatch problem. *Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens*, Brussels, v. 3, n. 8, p. 431–447, 1962.
- CCEE. *Câmara de Comercio de Energia Elétrica (CCEE)*: Leilão 27 a4. 2018. Acesso em: 23 de maio de 2019. Disponível em: [https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewjb4fa0uqrjAhW1HbkGHcnxA8wQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ccee.org.br%2Fccee%2Fdocumentos%2FCCEE\\_640187&usg=AOvVaw3ld02C6uPzjNrv\\_iRajRRF](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewjb4fa0uqrjAhW1HbkGHcnxA8wQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ccee.org.br%2Fccee%2Fdocumentos%2FCCEE_640187&usg=AOvVaw3ld02C6uPzjNrv_iRajRRF).
- CHEN, L. et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Piscataway, v. 48, n. 3, p. 327–339, 2001.
- CHRISTIE, R. *Power systems test case archive*. Washington University. 1973. Acesso em: 10 jun. 2019. Disponível em: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>.
- CONTAXIS, G.; DELKIS, C.; KORRES, G. Decoupled optimal load flow using linear or quadratic programming. *IEEE Transactions on Power systems*, Piscataway, v. 1, n. 2, p. 1–7, 1986.
- DOMMEL, H. W.; TINNEY, W. F. Optimal power flow solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 87, n. 10, p. 1866–1876, 1968.
- ECHEVERRI, M. G. *Planejamento e despacho ótimo de reativos (VAR) em sistemas de energia elétrica multi-áreas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira., 2011. Acesso em: 11 set. 2019. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100329/granadaecheverri\\_m\\_dr\\_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100329/granadaecheverri_m_dr_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 39, p. 748–764, 2014.
- ESTEVAM, C. et al. Reactive power dispatch and planning using a non-linear branch-and-bound algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Oxford, v. 4, n. 8, p. 963–973, 2010.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *Ampl: a modeling language for mathematical programming*. Pacific Grove: Duxbury Thomson Learning, p. 517, 2003. Disponível em: <https://vanderbei.princeton.edu/307/textbook/AMPLbook.pdf>.
- FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal power flow: a bibliographic survey i. *Energy Systems*, Springer, v. 3, n. 3, p. 221–258, 2012.
- GAN, D.; THOMAS, R. J.; ZIMMERMAN, R. D. Stability-constrained optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 535–540, 2000.

- GLINEUR, F. Conic optimization: an elegant framework for convex optimization. *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science*, Brussels, v. 41, n. 1-2, p. 5–28, 2001.
- GOMEZ-EXPOSITO, A.; CONEJO, A. J.; CANIZARES, C. Electric energy systems: analysis and operation. New York: CRC press, 2018.
- GOMEZ, T. et al. A security-constrained decomposition approach to optimal reactive power planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 1069–1076, 1991.
- GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 136–146, 1994.
- GRANVILLE, S.; LIMA, M. A. Application of decomposition techniques to var planning: methodological and computational aspects. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 1780–1787, 1994.
- IBA, K. Reactive power optimization by genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 685–692, 1994.
- ILOG. IBM ILOG CPLEX optimization studio - CPLEX user's manual - version 12 release 8. IBM Corporation, p. 570, 2017. Acesso em: 11 set. 2019. Disponível em: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P\\_12.8.0/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf).
- JABR, R. Optimal placement of capacitors in a radial network using conic and mixed integer linear programming. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 78, n. 6, p. 941–948, 2008.
- JABR, R. A. Radial distribution load flow using conic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1458–1459, 2006.
- JABR, R. A. A conic quadratic format for the load flow equations of meshed networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 2285–2286, 2007.
- JABR, R. A. Optimal power flow using an extended conic quadratic formulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 1000–1008, 2008.
- JABR, R. A. Recent developments in optimal power flow modeling techniques: Handbook of power systems ii. Springer, p. 3–29, 2010.
- JABR, R. A. Optimization of ac transmission system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 28, n. 3, p. 2779–2787, 2013.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. Power system stability and control. New York: McGraw-hill, v. 7, 1994.
- LAZARDS. *Lazards levelized cost of energy analysis*. 2018. Acesso em: 22 mai. 2019. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/450784/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf>.
- LEBOW, W. et al. A hierarchical approach to reactive volt ampere (var) optimization in system planning. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 104, n. 8, p. 2051–2057, 1985.

- LOBO, M. S. et al. Applications of second-order cone programming. *Linear Algebra and its Applications*, Philadelphia, v. 284, n. 1-3, p. 193–228, 1998.
- LÓPEZ, J. C. *Planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência multi-área através de modelos estocásticos*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira., 2014. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/juliocesarlopezquizhpi.pdf>>.
- LÓPEZ, J. et al. A convex chance-constrained model for reactive power planning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 71, p. 403–411, 2015.
- LUNA-RUBIO, R. et al. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*, Oxford, v. 86, n. 4, p. 1077–1088, 2012.
- MACEDO, L. H. et al. Milp branch flow model for concurrent ac multistage transmission expansion and reactive power planning with security constraints. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Stevenage, v. 10, n. 12, p. 3023–3032, 2016.
- MANTOVANI, J.; GARCIA, A. A heuristic method for reactive power planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 68–74, 1996.
- MANTOVANI, J.; MODESTO, S.; GARCIA, A. Var planning using genetic algorithm and linear programming. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Stevenage, v. 148, n. 3, p. 257–262, 2001.
- MATPOWER. *MATPOWER*. 2019. Acesso em: 06 mai. 2019. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower>>.
- MOLZAHN, D. K.; HISKENS, I. A. Sparsity-exploiting moment-based relaxations of the optimal power flow problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 30, n. 6, p. 3168–3180, 2015.
- MOLZAHN, D. K. et al. Implementation of a large-scale optimal power flow solver based on semidefinite programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 28, n. 4, p. 3987–3998, 2013.
- MOMOH, J. et al. Challenges to optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 12, n. 1, p. 444–455, 1997.
- MOMOH, J. A. A generalized quadratic-based model for optimal power flow. *Conference Proceedings, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Cambridge, p. 261–271, 1989.
- MOMOH, J. A.; ADAPA, R.; EL-HAWARY, M. A review of selected optimal power flow literature to 1993. i. nonlinear and quadratic programming approaches. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 96–104, 1999a.
- MOMOH, J. A.; EL-HAWARY, M.; ADAPA, R. A review of selected optimal power flow literature to 1993. ii. newton, linear programming and interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 105–111, 1999b.

- MONTICELLI, A. J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Edgard Blücher, São Paulo, 1983.
- MONTOYA-BUENO, S.; MUOZ, J. I.; CONTRERAS, J. A stochastic investment model for renewable generation in distribution systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Piscataway, v. 6, n. 4, p. 1466–1474, 2015.
- MOTA-PALOMINO, R.; QUINTANA, V. Sparse reactive power scheduling by a penalty function-linear programming technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 1, n. 3, p. 31–39, 1986.
- MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ARROYO, J. M. Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 31, n. 5, p. 3715–3728, 2016.
- NABONA, N.; FRERIS, L. Optimisation of economic dispatch through quadratic and linear programming. *IET Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Stevenage, v. 120, n. 5, p. 574–580, 1973.
- ONS. ONS. 2019. Acesso em: 04 jul. 2019. Disponível em: <<http://sdro.ons.org.br/SDRO/DIARIO/index.htm>>.
- ORTIZ, J. M. H. *Análise comparativa de um modelo de programação convexa e meta-heurística para o planejamento de redes de distribuição de energia elétrica com fontes de geração distribuída renováveis e não renováveis*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira., 2019. Acesso em: 11 set. 2019. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180928/homeortiz\\_jm\\_dr\\_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180928/homeortiz_jm_dr_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y)>.
- PFENNINGER, S.; STAFFELL, I. *Renewables. ninja*. 2016. Acesso em: 04 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.renewables.ninja>>.
- PROTOCOL, K. Kyoto protocol. *UNFCCC Website.*, 1997. Acesso em: 04 jul. 2019. Disponível em: <[http://unfccc.int/kyoto/\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto/_protocol/items/2830.php)>.
- PRUESSNER, A. et al. Conic programming in gams. In: *INFORMS Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 19–22.
- RADZIUKYNAS, V.; RADZIUKYNIENE, I. Optimization methods application to optimal power flow in electric power systems. In: . New York: Springer, 2009. p. 409–436.
- RAMOS, R.; VALLEJOS, J.; BARÁN, B. Multiobjective reactive power compensation with voltage security. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, São Paulo, p. 302–307, 2014.
- REHN, C. J.; BUBENKO, J. A.; SJELVGREN, D. Voltage optimization using augmented lagrangian functions and quasi-newton techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 1470–1483, 1989.
- ROSEHART, W.; SCHELLENBERG, A.; ROMAN, C. New tools for power system dynamic performance management. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 7p, 2006.



- SASSON, A.; VILORIA, F.; ABOYTES, F. Optimal load flow solution using the hessian matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 92, n. 1, p. 31–41, 1973.
- SAWIN, J. L. et al. Renewables 2018-global status report. a comprehensive annual overview of the state of renewable energy: Advancing the global renewable energy transition-highlights of the ren21 renewables 2018 global status report in perspective. 2018. Acesso em: 12 set. 2019. Disponível em: <<https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Highlights-2018.pdf>>.
- SHOULTS, R. R.; SUN, D. Optimal power flow based upon PQ decomposition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 101, n. 2, p. 397–405, 1982.
- SILVA, M. V. d. *Desenvolvimento de um modelo de programação convexa para o problema de fluxo de potência ótimo*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira., 2018.
- SPASH, C. L. The brave new world of carbon trading. *New Political Economy*, Abingdon, v. 15, n. 2, p. 169–195, 2010.
- STADLIN, W.; FLETCHER, D. Voltage versus reactive current model for dispatch and control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 101, n. 10, p. 3751–3760, 1982.
- STOTT, B.; HOBSON, E. Power system security control calculations using linear programming, part i. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 97, n. 5, p. 1713–1720, 1978a.
- STOTT, B.; HOBSON, E. Power system security control calculations using linear programming, part ii. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 97, n. 5, p. 1721–1731, 1978b.
- SUBBARAJ, P.; RAJNARAYANAN, P. Optimal reactive power dispatch using self-adaptive real coded genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 374–381, 2009.
- SUN, D. I. et al. Optimal power flow by newton approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS 103, n. 10, p. 2864–2880, 1984.
- TAYLOR, J. A.; HOVER, F. S. Conic ac transmission system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 28, n. 2, p. 952–959, 2013.
- TORRES, G. L.; QUINTANA, V. H. An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1211–1218, 1998.
- WELLS, D. Method for economic secure loading of a power system. *IET Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Stevenage, v. 115, n. 8, p. 1190–1194, 1968.
- YADAV, A.; SRIVASTAVA, L. Optimal placement of distributed generation: An overview and key issues. *IEEE International Conference on Power Signals Control and Computations — Epscicon*, Thrissur, p. 1–6, 2014.

- ZHANG, C. et al. Interval voltage control method for transmission systems considering interval uncertainties of renewable power generation and load demand. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Stevenage, v. 12, n. 17, p. 4016–4025, 2018.
- ZHANG, Y.-j.; REN, Z. Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the control devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1349–1356, 2005.
- ZHOU, W. et al. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, Oxford, v. 87, n. 2, p. 380–389, 2010.

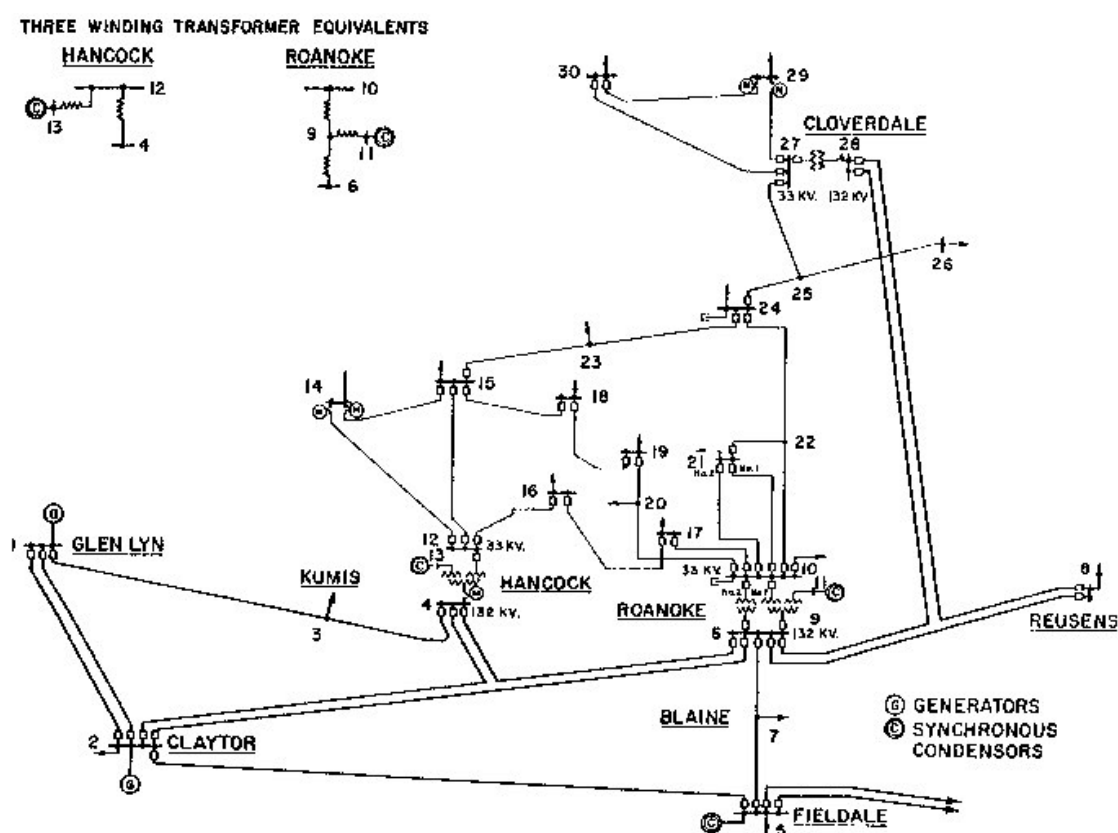
## Anexos

## ANEXO A – SISTEMAS TESTES

### A.1 SISTEMA IEEE30

A Figura (57) apresenta a topologia do sistema IEEE30. As Tabelas (31) e (32) apresentam os valores dos parâmetros de ramo e barra, respectivamente. As Tabelas (33) e (34) apresentam os valores dos custos das gerações e emissão de gases poluentes, respectivamente.

Figura 57 – Sistema IEEE30 - Topologia



Fonte: (CHRISTIE, 1973)

Tabela 31 – Sistema IEEE30 - Dados dos Ramos

	De	Para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0528	138,0000	0	0,00	0,00
2	1	3	0,0452	0,1652	0,0408	152,0000	0	0,00	0,00
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0368	139,0000	0	0,00	0,00
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0084	135,0000	0	0,00	0,00
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0418	144,0000	0	0,00	0,00
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0374	139,0000	0	0,00	0,00
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0090	148,0000	0	0,00	0,00
8	5	7	0,0460	0,1160	0,0204	127,0000	0	0,00	0,00
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0170	140,0000	0	0,00	0,00
10	6	8	0,0120	0,0420	0,0090	148,0000	0	0,00	0,00
11	6	9	0,0000	0,2080	0,0000	142,0000	33	1,10	0,90
12	6	10	0,0000	0,5560	0,0000	53,0000	33	1,10	0,90
13	9	11	0,0000	0,2080	0,0000	142,0000	0	0,00	0,00
14	9	10	0,0000	0,1100	0,0000	267,0000	0	0,00	0,00
15	4	12	0,0000	0,2560	0,0000	115,0000	33	1,10	0,90
16	12	13	0,0000	0,1400	0,0000	210,0000	0	0,00	0,00
17	12	14	0,1231	0,2559	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
18	12	15	0,0662	0,1304	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
19	12	16	0,0945	0,1987	0,0000	30,0000	0	0,00	0,00
20	14	15	0,2210	0,1997	0,0000	20,0000	0	0,00	0,00
21	16	17	0,0524	0,1923	0,0000	38,0000	0	0,00	0,00
22	15	18	0,1073	0,2185	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
23	18	19	0,0639	0,1292	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
24	19	20	0,0340	0,0680	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
25	10	20	0,0936	0,2090	0,0000	30,0000	0	0,00	0,00
26	10	17	0,0324	0,0845	0,0000	33,0000	0	0,00	0,00
27	10	21	0,0348	0,0749	0,0000	30,0000	0	0,00	0,00
28	10	22	0,0727	0,1499	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
29	21	22	0,0116	0,0236	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
30	15	23	0,1000	0,2020	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
31	22	24	0,1150	0,1790	0,0000	26,0000	0	0,00	0,00
32	23	24	0,1320	0,2700	0,0000	29,0000	0	0,00	0,00
33	24	25	0,1885	0,3292	0,0000	27,0000	0	0,00	0,00
34	25	26	0,2544	0,3800	0,0000	25,0000	0	0,00	0,00
35	25	27	0,1093	0,2087	0,0000	28,0000	0	0,00	0,00
36	28	27	0,0000	0,3960	0,0000	75,0000	33	1,10	0,90
37	27	29	0,2198	0,4153	0,0000	28,0000	0	0,00	0,00
38	27	30	0,3202	0,6027	0,0000	28,0000	0	0,00	0,00
39	29	30	0,2399	0,4533	0,0000	28,0000	0	0,00	0,00
40	8	28	0,0636	0,2000	0,0428	140,0000	0	0,00	0,00
41	6	28	0,0169	0,0599	0,0130	149,0000	0	0,00	0,00

Fonte: ([MATPOWER, 2019](#))

Tabela 32 – Sistema IEEE30 - Dados das barras

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
1	V $\theta$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	360,2000	0,0000	10,0000
2	PV	21,7000	12,7000	0,0000	0,0000	0,0000	140,0000	-40,0000	50,0000
3	PQ	2,4000	1,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	PQ	7,6000	1,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	PV	94,2000	19,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-40,0000	40,0000
6	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	PQ	22,8000	10,9000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	PV	30,0000	30,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-10,0000	40,0000
9	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	PQ	5,8000	2,0000	0,0000	0,1900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-6,0000	24,0000
12	PQ	11,2000	7,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
13	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-6,0000	24,0000
14	PQ	6,2000	1,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15	PQ	8,2000	2,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
16	PQ	3,5000	1,8000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
17	PQ	9,0000	5,8000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18	PQ	3,2000	0,9000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	PQ	9,5000	3,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	PQ	2,2000	0,7000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
21	PQ	17,5000	11,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
22	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	PQ	3,2000	1,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
24	PQ	8,7000	6,7000	0,0000	0,0430	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	PQ	3,5000	2,3000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	PQ	2,4000	0,9000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-6,0000	24,0000
30	PQ	10,6000	1,9000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: (MATPOWER, 2019)

Tabela 33 – Sistema IEEE30 - Custos dos tipos de gerações elétricas

	$c_{gt_2}$	$c_{gt_1}$	$c_{gt_0}$	$c_{gh_1}$	$c_{gh_0}$	$c_{ge_1}$	$c_{ge_0}$	$c_{gpv_1}$	$c_{gpv_0}$
1	100,0000	200,0000	10,0000	130,0000	156,0000	20,0000	60,0000	35,0000	50,0000
2	120,0000	150,0000	10,0000	97,5000	117,0000	20,0000	72,0000	35,0000	60,0000
5	40,000	180,000	20,0000	117,0000	140,4000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
8	60,0000	100,0000	10,0000	65,0000	78,0000	20,0000	36,0000	35,0000	30,0000
11	40,0000	180,0000	20,0000	117,0000	140,4000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
13	100,0000	150,0000	10,0000	97,5000	117,0000	20,0000	60,0000	35,0000	50,0000

Fonte: Adaptado de (ARAÚJO, 2018)

Tabela 34 – Sistema IEEE30 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termoe-létricas

	$\alpha_{gt}$	$\beta_{gt}$	$\gamma_{gt}$	$\zeta_{gt}$	$\lambda_{gt}$
1	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
2	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
5	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
8	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
11	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
13	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670

**Fonte:** Adaptado de ([ARAUJO, 2018](#))

### A.1.1 Modelo estocástico - Sistema IEEE30

Os dados de demanda, velocidade do vento, irradiação solar e temperatura ambiente são apresentados na Tabela (35). Na Tabela (36) apresentam-se as gerações de energia utilizadas na modelagem estocástico.

Tabela 35 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas IEEE118

Bloco	Demanda		Eólica		Solar		Temp. Amb. [ $^{\circ}C$ ]
	Nível [p.u]	Prob	Vel. [m/s]	Prob	Ir. Solar [ $W/m^2$ ]	Prob	
B1 (850 hrs)	1,0979	0,3000	9,9728	0,3000	860,8997	0,3000	32,9691
	1,0542	0,4000	8,5662	0,4000	224,4728	0,2376	28,3823
	1,0346	0,3000	7,3690	0,3000	00,0000	0,4624	23,4981
B2 (3000 hrs)	1,0106	0,3000	8,8486	0,3000	754,3633	0,3000	32,6124
	0,9783	0,4000	7,5551	0,4000	162,6225	0,2417	27,8632
	0,9528	0,3000	6,1259	0,3000	00,0000	0,4583	23,3531
B3 (4150 hrs)	0,9271	0,3000	10,9971	0,3000	755,4192	0,3000	30,9607
	0,8884	0,4000	9,0462	0,4000	165,9477	0,2414	25,8010
	0,8362	0,3000	7,6863	0,3000	00,0000	0,4586	21,2029
B4 (760 hrs)	0,7962	0,3000	10,4605	0,3000	812,4897	0,3000	32,8750
	0,7717	0,4000	8,7318	0,4000	213,2312	0,2474	28,2776
	0,7211	0,3000	7,1472	0,3000	00,0000	0,4526	23,2798

**Fonte:** Próprio Autor

Tabela 36 – Sistema IEEE30 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3

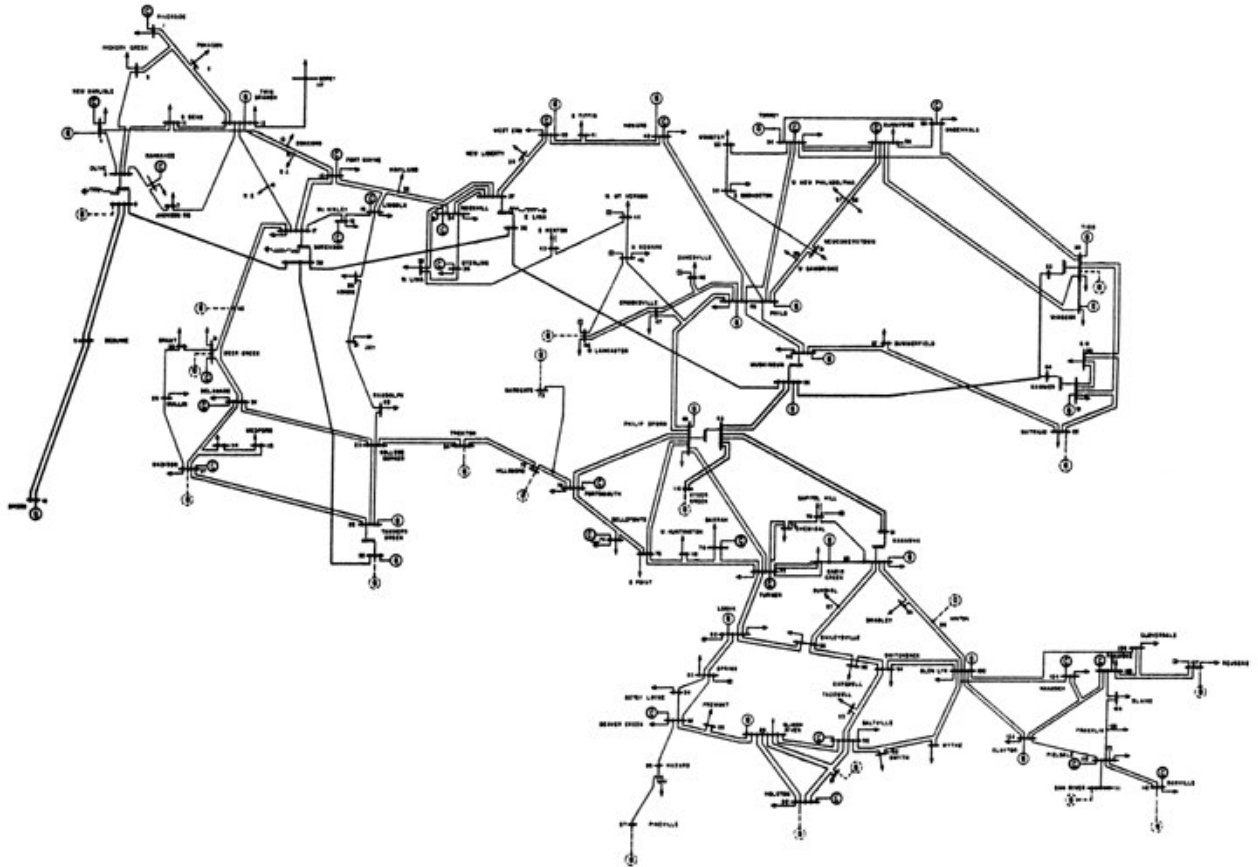
Caso	Termoelétrica	Hidroelétrica	Eólica	Fotovoltaica
E1	Todas barras	-	-	-
E2	Demais barras	1, 2 e 8	-	-
E3	Demais barras	1 e 8	5	13

**Fonte:** Próprio Autor

## A.2 SISTEMA IEEE118

A Figura (58) apresenta a topologia do sistema IEEE118. As Tabelas (37) e (38) apresentam os valores dos parâmetros de ramo e barra, respectivamente. As Tabelas (39) e (40) apresentam os valores dos custos das gerações e emissão de poluentes, respectivamente.

Figura 58 – Sistema IEEE118 - Topologia



Fonte:([CHRISTIE, 1973](#))

Tabela 37 – Sistema IEEE118 - Dados dos ramos

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
1	1	2	0,0303	0,0999	0,0254	200,0000	0	0,00	0,00
2	1	3	0,0129	0,0424	0,0108	200,0000	0	0,00	0,00
3	4	5	0,0018	0,0080	0,0021	200,0000	0	0,00	0,00
4	3	5	0,0241	0,1080	0,0284	200,0000	0	0,00	0,00
5	5	6	0,0119	0,0540	0,0143	200,0000	0	0,00	0,00
6	6	7	0,0046	0,0208	0,0055	200,0000	0	0,00	0,00
7	8	9	0,0024	0,0305	1,1620	800,0000	0	0,00	0,00
8	8	5	0,0000	0,0267	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
9	9	10	0,0026	0,0322	1,2300	800,0000	0	0,00	0,00
10	4	11	0,0209	0,0688	0,0175	200,0000	0	0,00	0,00
11	5	11	0,0203	0,0682	0,0174	200,0000	0	0,00	0,00
12	11	12	0,0060	0,0196	0,0050	200,0000	0	0,00	0,00
13	2	12	0,0187	0,0616	0,0157	200,0000	0	0,00	0,00
14	3	12	0,0484	0,1600	0,0406	200,0000	0	0,00	0,00

continua na próxima página



Tabela 37 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
15	7	12	0,0086	0,0340	0,0087	200,0000	0	0,00	0,00
16	11	13	0,0223	0,0731	0,0188	200,0000	0	0,00	0,00
17	12	14	0,0215	0,0707	0,0182	200,0000	0	0,00	0,00
18	13	15	0,0744	0,2444	0,0627	200,0000	0	0,00	0,00
19	14	15	0,0595	0,1950	0,0502	200,0000	0	0,00	0,00
20	12	16	0,0212	0,0834	0,0214	200,0000	0	0,00	0,00
21	15	17	0,0132	0,0437	0,0444	800,0000	0	0,00	0,00
22	16	17	0,0454	0,1801	0,0466	200,0000	0	0,00	0,00
23	17	18	0,0123	0,0505	0,0130	200,0000	0	0,00	0,00
24	18	19	0,0112	0,0493	0,0114	200,0000	0	0,00	0,00
25	19	20	0,0252	0,1170	0,0298	200,0000	0	0,00	0,00
26	15	19	0,0120	0,0394	0,0101	200,0000	0	0,00	0,00
27	20	21	0,0183	0,0849	0,0216	200,0000	0	0,00	0,00
28	21	22	0,0209	0,0970	0,0246	200,0000	0	0,00	0,00
29	22	23	0,0342	0,1590	0,0404	200,0000	0	0,00	0,00
30	23	24	0,0135	0,0492	0,0498	200,0000	0	0,00	0,00
31	23	25	0,0156	0,0800	0,0864	800,0000	0	0,00	0,00
32	26	25	0,0000	0,0382	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
33	25	27	0,0318	0,1630	0,1764	800,0000	0	0,00	0,00
34	27	28	0,0191	0,0855	0,0216	200,0000	0	0,00	0,00
35	28	29	0,0237	0,0943	0,0238	200,0000	0	0,00	0,00
36	30	17	0,0000	0,0388	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
37	8	30	0,0043	0,0504	0,5140	200,0000	0	0,00	0,00
38	26	30	0,0080	0,0860	0,9080	800,0000	0	0,00	0,00
39	17	31	0,0474	0,1563	0,0399	200,0000	0	0,00	0,00
40	29	31	0,0108	0,0331	0,0083	200,0000	0	0,00	0,00
41	23	32	0,0317	0,1153	0,1173	200,0000	0	0,00	0,00
42	31	32	0,0298	0,0985	0,0251	200,0000	0	0,00	0,00
43	27	32	0,0229	0,0755	0,0193	200,0000	0	0,00	0,00
44	15	33	0,0380	0,1244	0,0319	200,0000	0	0,00	0,00
45	19	34	0,0752	0,2470	0,0632	200,0000	0	0,00	0,00
46	35	36	0,0022	0,0102	0,0027	200,0000	0	0,00	0,00
47	35	37	0,0110	0,0497	0,0132	200,0000	0	0,00	0,00
48	33	37	0,0415	0,1420	0,0366	200,0000	0	0,00	0,00
49	34	36	0,0087	0,0268	0,0057	200,0000	0	0,00	0,00
50	34	37	0,0026	0,0094	0,0098	800,0000	0	0,00	0,00
51	38	37	0,0000	0,0375	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
52	37	39	0,0321	0,1060	0,0270	200,0000	0	0,00	0,00
53	37	40	0,0593	0,1680	0,0420	200,0000	0	0,00	0,00
54	30	38	0,0046	0,0540	0,4220	1000,0000	0	0,00	0,00
55	39	40	0,0184	0,0605	0,0155	200,0000	0	0,00	0,00
56	40	41	0,0145	0,0487	0,0122	200,0000	0	0,00	0,00
57	40	42	0,0555	0,1830	0,0466	200,0000	0	0,00	0,00
58	41	42	0,0410	0,1350	0,0344	200,0000	0	0,00	0,00
59	43	44	0,0608	0,2454	0,0607	200,0000	0	0,00	0,00
60	34	43	0,0413	0,1681	0,0423	200,0000	0	0,00	0,00
61	44	45	0,0224	0,0901	0,0224	200,0000	0	0,00	0,00
62	45	46	0,0400	0,1356	0,0332	200,0000	0	0,00	0,00
63	46	47	0,0380	0,1270	0,0316	200,0000	0	0,00	0,00
64	46	48	0,0601	0,1890	0,0472	200,0000	0	0,00	0,00
65	47	49	0,0191	0,0625	0,0160	200,0000	0	0,00	0,00
66	42	49	0,0715	0,3230	0,0860	200,0000	0	0,00	0,00
67	42	49	0,0715	0,3230	0,0860	200,0000	0	0,00	0,00
68	45	49	0,0684	0,1860	0,0444	200,0000	0	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 37 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
69	48	49	0,0179	0,0505	0,0126	200,0000	0	0,00	0,00
70	49	50	0,0267	0,0752	0,0187	200,0000	0	0,00	0,00
71	49	51	0,0486	0,1370	0,0342	200,0000	0	0,00	0,00
72	51	52	0,0203	0,0588	0,0140	200,0000	0	0,00	0,00
73	52	53	0,0405	0,1635	0,0406	200,0000	0	0,00	0,00
74	53	54	0,0263	0,1220	0,0310	200,0000	0	0,00	0,00
75	49	54	0,0730	0,2890	0,0738	200,0000	0	0,00	0,00
76	49	54	0,0869	0,2910	0,0730	200,0000	0	0,00	0,00
77	54	55	0,0169	0,0707	0,0202	200,0000	0	0,00	0,00
78	54	56	0,0028	0,0096	0,0073	200,0000	0	0,00	0,00
79	55	56	0,0049	0,0151	0,0037	200,0000	0	0,00	0,00
80	56	57	0,0343	0,0966	0,0242	200,0000	0	0,00	0,00
81	50	57	0,0474	0,1340	0,0332	200,0000	0	0,00	0,00
82	56	58	0,0343	0,0966	0,0242	200,0000	0	0,00	0,00
83	51	58	0,0255	0,0719	0,0179	200,0000	0	0,00	0,00
84	54	59	0,0503	0,2293	0,0598	200,0000	0	0,00	0,00
85	56	59	0,0825	0,2510	0,0569	200,0000	0	0,00	0,00
86	56	59	0,0803	0,2390	0,0536	200,0000	0	0,00	0,00
87	55	59	0,0474	0,2158	0,0565	200,0000	0	0,00	0,00
88	59	60	0,0317	0,1450	0,0376	200,0000	0	0,00	0,00
89	59	61	0,0328	0,1500	0,0388	200,0000	0	0,00	0,00
90	60	61	0,0026	0,0135	0,0146	800,0000	0	0,00	0,00
91	60	62	0,0123	0,0561	0,0147	200,0000	0	0,00	0,00
92	61	62	0,0082	0,0376	0,0098	200,0000	0	0,00	0,00
93	63	59	0,0000	0,0386	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
94	63	64	0,0017	0,0200	0,2160	800,0000	0	0,00	0,00
95	64	61	0,0000	0,0268	0,0000	1000,0000	33	1,10	0,90
96	38	65	0,0090	0,0986	1,0460	800,0000	0	0,00	0,00
97	64	65	0,0027	0,0302	0,3800	800,0000	0	0,00	0,00
98	49	66	0,0180	0,0919	0,0248	800,0000	0	0,00	0,00
99	49	66	0,0180	0,0919	0,0248	800,0000	0	0,00	0,00
100	62	66	0,0482	0,2180	0,0578	200,0000	0	0,00	0,00
101	62	67	0,0258	0,1170	0,0310	200,0000	0	0,00	0,00
102	65	66	0,0000	0,0370	0,0000	1000,0000	33	1,100	0,90
103	66	67	0,0224	0,1015	0,0268	200,0000	0	0,00	0,00
104	65	68	0,0014	0,0160	0,6380	200,0000	0	0,00	0,00
105	47	69	0,0844	0,2778	0,0709	200,0000	0	0,00	0,00
106	49	69	0,0985	0,3240	0,0828	200,0000	0	0,00	0,00
107	68	69	0,0000	0,0370	0,0000	1000,0000	33	1,100	0,90
108	69	70	0,0300	0,1270	0,1220	800,0000	0	0,00	0,00
109	24	70	0,0022	0,4115	0,1020	200,0000	0	0,00	0,00
110	70	71	0,0088	0,0355	0,0088	200,0000	0	0,00	0,00
111	24	72	0,0488	0,1960	0,0488	200,0000	0	0,00	0,00
112	71	72	0,0446	0,1800	0,0444	200,0000	0	0,00	0,00
113	71	73	0,0087	0,0454	0,0118	200,0000	0	0,00	0,00
114	70	74	0,0401	0,1323	0,0337	200,0000	0	0,00	0,00
115	70	75	0,0428	0,1410	0,0360	200,0000	0	0,00	0,00
116	69	75	0,0405	0,1220	0,1240	800,0000	0	0,00	0,00
117	74	75	0,0123	0,0406	0,0103	200,0000	0	0,00	0,00
118	76	77	0,0444	0,1480	0,0368	200,0000	0	0,00	0,00
119	69	77	0,0309	0,1010	0,1038	200,0000	0	0,00	0,00
120	75	77	0,0601	0,1999	0,0498	200,0000	0	0,00	0,00
121	77	78	0,0038	0,0124	0,0126	200,0000	0	0,00	0,00
122	78	79	0,0055	0,0244	0,0065	200,0000	0	0,00	0,00

continua na próxima página

**Tabela 37 – continuação da página anterior**

	<b>de</b>	<b>para</b>	<b>r [p.u]</b>	<b>x [p.u]</b>	<b>bsh [p.u]</b>	<b>Smax [p.u]</b>	<b>ntap</b>	<b>rMtap</b>	<b>rmtap</b>
123	77	80	0,0170	0,0485	0,0472	800,0000	0	0,00	0,00
124	77	80	0,0294	0,1050	0,0228	800,0000	0	0,00	0,00
125	79	80	0,0156	0,0704	0,0187	200,0000	0	0,00	0,00
126	68	81	0,0018	0,0202	0,8080	200,0000	0	0,00	0,00
127	81	80	0,0000	0,0370	0,0000	1000,0000	33	1,100	0,90
128	77	82	0,0298	0,0853	0,0817	200,0000	0	0,00	0,00
129	82	83	0,0112	0,0367	0,0380	200,0000	0	0,00	0,00
130	83	84	0,0625	0,1320	0,0258	200,0000	0	0,00	0,00
131	83	85	0,0430	0,1480	0,0348	200,0000	0	0,00	0,00
132	84	85	0,0302	0,0641	0,0123	200,0000	0	0,00	0,00
133	85	86	0,0350	0,1230	0,0276	200,0000	0	0,00	0,00
134	86	87	0,0283	0,2074	0,0445	1000,0000	0	0,00	0,00
135	85	88	0,0200	0,1020	0,0276	200,0000	0	0,00	0,00
136	85	89	0,0239	0,1730	0,0470	200,0000	0	0,00	0,00
137	88	89	0,0139	0,0712	0,0193	800,0000	0	0,00	0,00
138	89	90	0,0518	0,1880	0,0528	800,0000	0	0,00	0,00
139	89	90	0,0238	0,0997	0,1060	800,0000	0	0,00	0,00
140	90	91	0,0254	0,0836	0,0214	200,0000	0	0,00	0,00
141	89	92	0,0099	0,0505	0,0548	800,0000	0	0,00	0,00
142	89	92	0,0393	0,1581	0,0414	800,0000	0	0,00	0,00
143	91	92	0,0387	0,1272	0,0327	200,0000	0	0,00	0,00
144	92	93	0,0258	0,0848	0,0218	200,0000	0	0,00	0,00
145	92	94	0,0481	0,1580	0,0406	200,0000	0	0,00	0,00
146	93	94	0,0223	0,0732	0,0188	200,0000	0	0,00	0,00
147	94	95	0,0132	0,0434	0,0111	200,0000	0	0,00	0,00
148	80	96	0,0356	0,1820	0,0494	200,0000	0	0,00	0,00
149	82	96	0,0162	0,0530	0,0544	200,0000	0	0,00	0,00
150	94	96	0,0269	0,0869	0,0230	200,0000	0	0,00	0,00
151	80	97	0,0183	0,0934	0,0254	200,0000	0	0,00	0,00
152	80	98	0,0238	0,1080	0,0286	200,0000	0	0,00	0,00
153	80	99	0,0454	0,2060	0,0546	200,0000	0	0,00	0,00
154	92	100	0,0648	0,2950	0,0472	200,0000	0	0,00	0,00
155	94	100	0,0178	0,0580	0,0604	200,0000	0	0,00	0,00
156	95	96	0,0171	0,0547	0,0147	200,0000	0	0,00	0,00
157	96	97	0,0173	0,0885	0,0240	200,0000	0	0,00	0,00
158	98	100	0,0397	0,1790	0,0476	200,0000	0	0,00	0,00
159	99	100	0,0180	0,0813	0,0216	200,0000	0	0,00	0,00
160	100	101	0,0277	0,1262	0,0328	200,0000	0	0,000	0,00
161	92	102	0,0123	0,0559	0,0146	200,0000	0	0,00	0,00
162	101	102	0,0246	0,1120	0,0294	200,0000	0	0,000	0,00
163	100	103	0,0160	0,0525	0,0536	800,0000	0	0,000	0,00
164	100	104	0,0451	0,2040	0,0541	200,0000	0	0,000	0,00
165	103	104	0,0466	0,1584	0,0407	200,0000	0	0,000	0,00
166	103	105	0,0535	0,1625	0,0408	200,0000	0	0,000	0,00
167	100	106	0,0605	0,2290	0,0620	200,0000	0	0,000	0,00
168	104	105	0,0099	0,0378	0,0099	200,0000	0	0,000	0,00
169	105	106	0,0140	0,0547	0,0143	200,0000	0	0,000	0,00
170	105	107	0,0530	0,1830	0,0472	200,0000	0	0,000	0,00
171	105	108	0,0261	0,0703	0,0184	200,0000	0	0,000	0,00
172	106	107	0,0530	0,1830	0,0472	200,0000	0	0,000	0,00
173	108	109	0,0105	0,0288	0,0076	200,0000	0	0,000	0,00
174	103	110	0,0391	0,1813	0,0461	200,0000	0	0,000	0,00
175	109	110	0,0278	0,0762	0,0202	200,0000	0	0,000	0,00
176	110	111	0,0220	0,0755	0,0200	200,0000	0	0,000	0,00

continua na próxima página

Tabela 37 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u.]	x [p.u.]	bsh [p.u.]	Smax [p.u.]	ntap	rMtap	rmtap
177	110	112	0,0247	0,0640	0,0620	200,0000	0	0,000	0,00
178	17	113	0,0091	0,0301	0,0077	200,0000	0	0,00	0,00
179	32	113	0,0615	0,2030	0,0518	200,0000	0	0,00	0,00
180	32	114	0,0135	0,0612	0,0163	200,0000	0	0,00	0,00
181	27	115	0,0164	0,0741	0,0197	200,0000	0	0,00	0,00
182	114	115	0,0023	0,0104	0,0028	200,0000	0	0,000	0,00
183	68	116	0,0003	0,0041	0,1640	800,0000	0	0,00	0,00
184	12	117	0,0329	0,1400	0,0358	200,0000	0	0,00	0,00
185	75	118	0,0145	0,0481	0,0120	200,0000	0	0,00	0,00
186	76	118	0,0164	0,0544	0,0136	200,0000	0	0,00	0,00

Fonte: (MATPOWER, 2019)

Tabela 38 – Sistema IEEE118 - Dados das barras

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
1	PV	51,0000	27,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-5,0000	15,0000
2	PQ	20,0000	9,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	PQ	39,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	PV	39,0000	12,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
5	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	-0,8000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	PV	52,0000	22,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-13,0000	50,0000
7	PQ	19,0000	2,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	PV	28,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
9	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	550,0000	-147,0000	200,0000
11	PQ	70,0000	23,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	PV	47,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	185,0000	-35,0000	120,0000
13	PQ	34,0000	16,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	PQ	14,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15	PV	90,0000	30,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-10,0000	30,0000
16	PQ	25,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
17	PQ	11,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18	PV	60,0000	34,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-16,0000	50,0000
19	PV	45,0000	25,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	24,0000
20	PQ	18,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
21	PQ	14,0000	8,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
22	PQ	10,0000	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	PQ	7,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
24	PV	13,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
25	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	320,0000	-47,0000	140,0000
26	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	414,0000	-1000,0000	1000,0000
27	PV	71,0000	13,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
28	PQ	17,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	PQ	24,0000	4,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	PV	43,0000	27,0000	0,0000	0,0000	0,0000	107,0000	-300,0000	300,0000
32	PV	59,0000	23,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-14,0000	42,0000
33	PQ	23,0000	9,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	PV	59,0000	26,0000	0,0000	0,2800	0,0000	100,0000	-8,0000	24,0000
35	PQ	33,0000	9,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	PV	31,0000	17,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	24,0000
37	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
38	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
39	PQ	27,0000	11,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	PV	66,0000	23,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
41	PQ	37,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	PV	96,0000	23,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
43	PQ	18,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44	PQ	16,0000	8,0000	0,0000	0,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	PQ	53,0000	22,0000	0,0000	0,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	PV	28,0000	10,0000	0,0000	0,2000	0,0000	119,0000	-100,0000	100,0000
47	PQ	34,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	PQ	20,0000	11,0000	0,0000	0,3000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	PV	87,0000	30,0000	0,0000	0,0000	0,0000	304,0000	-85,0000	210,0000
50	PQ	17,0000	4,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
51	PQ	17,0000	8,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
52	PQ	18,0000	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
53	PQ	23,0000	11,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
54	PV	113,0000	32,0000	0,0000	0,0000	0,0000	148,0000	-300,0000	300,0000
55	PV	63,0000	22,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
56	PV	84,0000	18,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	15,0000
57	PQ	12,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
58	PQ	12,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
59	PV	277,0000	113,0000	0,0000	0,0000	0,0000	255,0000	-60,0000	180,0000
60	PQ	78,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
61	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	260,0000	-100,0000	300,0000
62	PV	77,0000	14,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-20,0000	20,0000
63	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
64	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
65	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	491,0000	-67,0000	200,0000
66	PV	39,0000	18,0000	0,0000	0,0000	0,0000	492,0000	-67,0000	200,0000
67	PQ	28,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
68	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
69	V $\theta$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	805,2000	-300,0000	300,0000
70	PV	66,0000	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-10,0000	32,0000
71	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
72	PV	12,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	100,0000
73	PV	6,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	100,0000
74	PV	68,0000	27,0000	0,0000	0,2400	0,0000	100,0000	-6,0000	9,0000
75	PQ	47,0000	11,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
76	PV	68,0000	36,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
77	PV	61,0000	28,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-20,0000	70,0000
78	PQ	71,0000	26,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	PQ	39,0000	32,0000	0,0000	0,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
80	PV	130,0000	26,0000	0,0000	0,0000	0,0000	577,0000	-165,0000	280,0000
81	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
82	PQ	54,0000	27,0000	0,0000	0,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
83	PQ	20,0000	10,0000	0,0000	0,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
84	PQ	11,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
85	PV	24,0000	15,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
86	PQ	21,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
87	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	104,0000	-100,0000	1000,0000
88	PQ	48,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
89	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	707,0000	-210,0000	300,0000
90	PV	163,0000	42,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-300,0000	300,0000
91	PV	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	100,0000
92	PV	65,0000	10,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-3,0000	9,0000
93	PQ	12,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	PQ	30,0000	16,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
95	PQ	42,0000	31,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página

Tabela 38 – continuação da página anterior

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
96	PQ	38,0000	15,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
97	PQ	15,0000	9,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
98	PQ	34,0000	8,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
99	PV	42,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	100,0000
100	PV	37,0000	18,0000	0,0000	0,0000	0,0000	352,0000	-50,0000	155,0000
101	PQ	22,0000	15,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
102	PQ	5,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
103	PV	23,0000	16,0000	0,0000	0,0000	0,0000	140,0000	-15,0000	40,0000
104	PV	38,0000	25,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
105	PV	31,0000	26,0000	0,0000	0,4000	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
106	PQ	43,0000	16,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
107	PV	50,0000	12,0000	0,0000	0,1200	0,0000	100,0000	-200,0000	200,0000
108	PQ	2,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
109	PQ	8,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
110	PV	39,0000	30,0000	0,0000	0,1200	0,0000	100,0000	-8,0000	23,0000
111	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	136,0000	-100,0000	1000,0000
112	PV	68,0000	13,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	1000,0000
113	PV	6,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-100,0000	200,0000
114	PQ	8,0000	3,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
115	PQ	22,0000	7,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
116	PV	184,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	-1000,0000	1000,0000
117	PQ	20,0000	8,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
118	PQ	33,0000	15,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: (MATPOWER, 2019)

Tabela 39 – Sistema IEEE118 - Custos dos tipos de gerações elétricas

	$C_{gt_2}$	$C_{gt_1}$	$C_{gt_0}$	$C_{gh_1}$	$C_{gh_0}$	$C_{ge_1}$	$C_{ge_0}$	$C_{gpv_1}$	$C_{gpv_0}$
1	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
4	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0070	20,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	0,0090	20,0000	0,1176	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
18	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
24	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,0060	20,0000	0,0455	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,0060	20,0000	0,0318	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,0070	20,0000	1,4286	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	0,0070	20,0000	0,5263	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	0,0080	20,0000	0,0490	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
54	0,0070	20,0000	0,2083	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
55	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
56	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
59	0,0060	20,0000	0,0645	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
61	0,0080	20,0000	0,0625	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
62	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
65	0,0080	20,0000	0,0256	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
66	0,0080	20,0000	0,0255	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
69	0,0060	20,0000	0,0194	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
70	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
72	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
73	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
74	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
76	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
77	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
80	0,0070	20,0000	0,0210	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
85	0,0090	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
87	0,0060	20,0000	2,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
89	0,0070	20,0000	0,0165	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
91	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
92	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
99	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
100	0,0080	20,0000	0,0397	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
103	0,0070	20,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
104	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
105	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
107	0,0100	40,0000	0,0100	26,0000	48,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
110	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
111	0,0060	20,0000	0,2778	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
113	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
116	0,0100	40,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Adaptado de (ARAÚJO, 2018)

Tabela 40 – Sistema IEEE118 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termo-elétricas

	$\alpha_{gt}$	$\beta_{gt}$	$\gamma_{gt}$	$\zeta_{gt}$	$\lambda_{gt}$
1	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
4	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
6	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
8	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
10	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
12	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
15	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
18	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
19	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
24	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
25	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
26	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
27	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000000	6,6670
31	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
32	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
34	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
36	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
40	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
42	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
46	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
49	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
54	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
55	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
56	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
59	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
61	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
62	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
65	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
66	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
69	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
70	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
72	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
73	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
74	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
76	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
77	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
80	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
85	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
87	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
89	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
90	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
91	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
92	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
99	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
100	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
103	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
104	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
105	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
107	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,3330
110	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
111	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
112	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
113	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
116	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570

Fonte: Adaptado de ([ARAUJO, 2018](#))



### A.2.1 Modelo estocástico - Sistema IEEE118

Os dados de demanda, velocidade do vento, irradiação solar e temperatura ambiente são apresentados na Tabela (41). Na Tabela (42) apresentam-se as gerações de energia utilizadas na modelagem estocástico.

Tabela 41 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas IEEE118

Bloco	Demanda		Eólica		Solar		Temp. Amb. [ $^{\circ}C$ ]
	Nível [ $p.u$ ]	Prob	Vel. [ $m/s$ ]	Prob	Ir. Solar [ $W/m^2$ ]	Prob	
B1 (850 hrs)	1,0979	0,3000	9,9728	0,3000	860,8997	0,3000	32,9691
	1,0542	0,4000	8,5662	0,4000	224,4728	0,2376	28,3823
	1,0346	0,3000	7,3690	0,3000	00,0000	0,4624	23,4981
B2 (3000 hrs)	1,0106	0,3000	8,8486	0,3000	754,3633	0,3000	32,6124
	0,9783	0,4000	7,5551	0,4000	162,6225	0,2417	27,8632
	0,9528	0,3000	6,1259	0,3000	00,0000	0,4583	23,3531
B3 (4150 hrs)	0,9271	0,3000	10,9971	0,3000	755,4192	0,3000	30,9607
	0,8884	0,4000	9,0462	0,4000	165,9477	0,2414	25,8010
	0,8362	0,3000	7,6863	0,3000	00,0000	0,4586	21,2029
B4 (760 hrs)	0,7962	0,3000	10,4605	0,3000	812,4897	0,3000	32,8750
	0,7717	0,4000	8,7318	0,4000	213,2312	0,2474	28,2776
	0,7211	0,3000	7,1472	0,3000	00,0000	0,4526	23,2798

Fonte: Próprio Autor

Tabela 42 – Sistemas IEEE118 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3

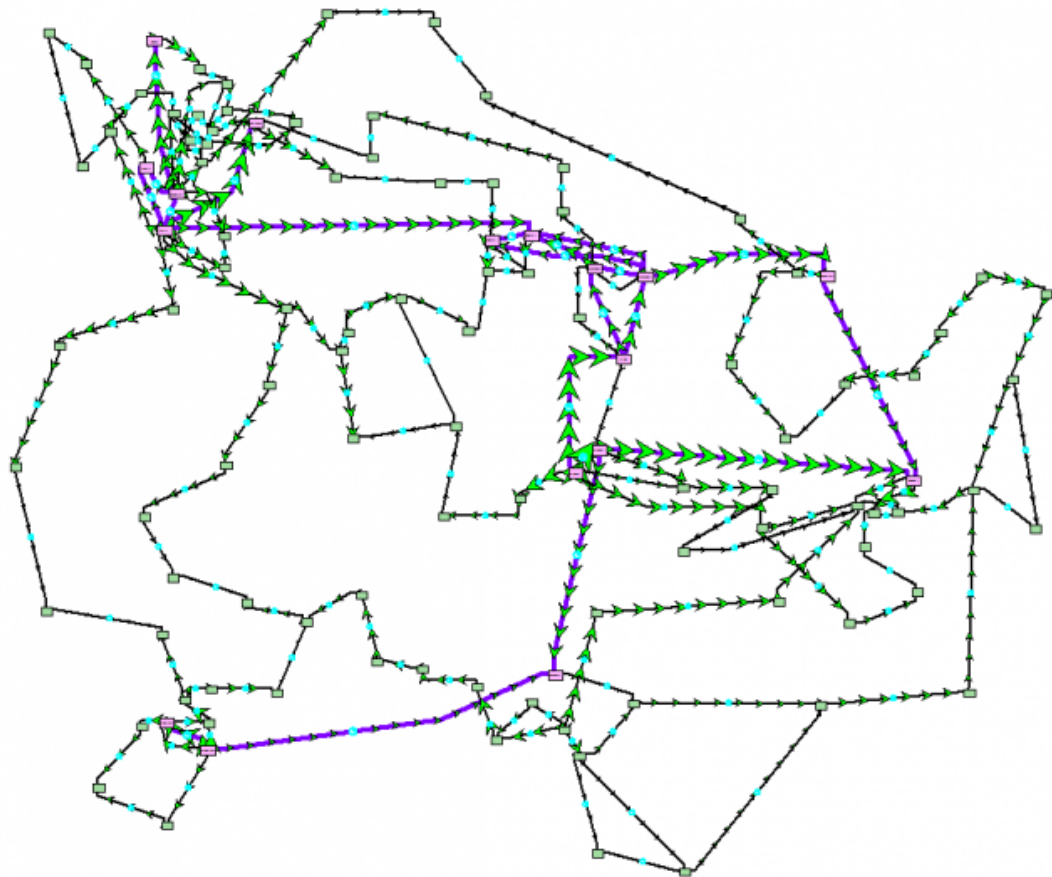
Caso	Termoelétrica	Hidroelétrica	Eólica	Fotovoltaica
E1	Todas barras	-	-	-
E2	Demais barras	1, 4, 8, 15, 19, 24, 26, 31, 40, 42, 56, 69, 99 e 107	-	-
E3	Demais barras	4, 8, 24, 26, 31, 40, 42 e 69	1, 15, 19 e 56	73, 91, 99 e 107

Fonte: Próprio Autor

A.3 SISTEMA ACTIVSG200

A Figura (59) apresenta a topologia do sistema ACTIVSg200. As Tabelas (43) e (44) apresentam os valores dos parâmetros de ramo e barra, respectivamente, do sistema. As Tabelas (45) e (46) apresentam os valores dos custos das gerações e emissão de gases poluentes, respectivamente.

Figura 59 – Topologia - Sistema ACTIVSg200



Fonte: (BIRCHFIELD et al., 2016)

Tabela 43 – Sistema ACTIVSg200 - Dados dos ramos

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
1	2	1	0,0007	0,0033	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
2	1	119	0,0185	0,1198	0,0229	221,1000	0	0,00	0,00
3	124	1	0,0056	0,0363	0,0069	221,1000	0	0,00	0,00
4	193	1	0,0043	0,0275	0,0053	221,1000	0	0,00	0,00
5	4	3	0,0006	0,0033	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
6	57	3	0,0085	0,0581	0,0099	221,1000	0	0,00	0,00
7	3	137	0,0059	0,0380	0,0073	221,1000	0	0,00	0,00
8	6	5	0,0007	0,0033	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
9	48	5	0,0063	0,0435	0,0071	221,1000	0	0,00	0,00

continua na próxima página

**Tabela 43 – continuação da página anterior**

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
10	5	64	0,0079	0,0549	0,0090	221,1000	0	0,00	0,00
11	8	7	0,0006	0,0032	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
12	7	86	0,0038	0,0243	0,0046	221,1000	0	0,00	0,00
13	7	101	0,0036	0,0232	0,0044	221,1000	0	0,00	0,00
14	7	148	0,0087	0,0560	0,0107	221,1000	0	0,00	0,00
15	10	9	0,0006	0,0040	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
16	9	124	0,0081	0,0551	0,0094	221,1000	0	0,00	0,00
17	131	9	0,0041	0,0267	0,0051	221,1000	0	0,00	0,00
18	9	141	0,0045	0,0310	0,0051	221,1000	0	0,00	0,00
19	9	193	0,0037	0,0252	0,0043	221,1000	0	0,00	0,00
20	12	11	0,0005	0,0035	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
21	13	11	0,0006	0,0036	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
22	11	15	0,0104	0,0672	0,0128	221,1000	0	0,00	0,00
23	11	93	0,0184	0,1281	0,0210	221,1000	0	0,00	0,00
24	158	11	0,0085	0,0582	0,0099	221,1000	0	0,00	0,00
25	15	14	0,0006	0,0275	0,0000	300,0000	33	1,10	0,90
26	14	121	0,0070	0,0501	0,0913	402,3600	0	0,00	0,00
27	14	149	0,0091	0,0652	0,1190	402,3600	0	0,00	0,00
28	16	15	0,0006	0,0032	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
29	18	17	0,0005	0,0039	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
30	19	17	0,0005	0,0031	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
31	20	17	0,0006	0,0033	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
32	21	17	0,0006	0,0039	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
33	109	17	0,0098	0,0682	0,0112	221,1000	0	0,00	0,00
34	17	120	0,0103	0,0705	0,0120	221,1000	0	0,00	0,00
35	23	22	0,0006	0,0032	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
36	24	22	0,0007	0,0031	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
37	22	27	0,0114	0,0735	0,0140	221,1000	0	0,00	0,00
38	158	22	0,0127	0,0868	0,0148	221,1000	0	0,00	0,00
39	26	25	0,0006	0,0031	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
40	25	64	0,0076	0,0532	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
41	199	25	0,0099	0,0640	0,0122	221,1000	0	0,00	0,00
42	28	27	0,0006	0,0040	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
43	27	93	0,0252	0,1754	0,0287	221,1000	0	0,00	0,00
44	27	158	0,0204	0,1320	0,0252	221,1000	0	0,00	0,00
45	30	29	0,0007	0,0031	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
46	124	29	0,0056	0,0387	0,0063	221,1000	0	0,00	0,00
47	29	140	0,0079	0,0550	0,0090	221,1000	0	0,00	0,00
48	32	31	0,0007	0,0039	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
49	33	31	0,0005	0,0036	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
50	177	31	0,0084	0,0586	0,0096	221,1000	0	0,00	0,00
51	192	31	0,0081	0,0553	0,0094	221,1000	0	0,00	0,00
52	35	34	0,0006	0,0037	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
53	34	54	0,0063	0,0428	0,0073	221,1000	0	0,00	0,00
54	34	137	0,0069	0,0446	0,0085	221,1000	0	0,00	0,00
55	37	36	0,0006	0,0033	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
56	38	36	0,0007	0,0035	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
57	58	36	0,0109	0,0744	0,0127	221,1000	0	0,00	0,00
58	83	36	0,0096	0,0670	0,0110	221,1000	0	0,00	0,00
59	40	39	0,0005	0,0031	0,0000	100,0000	0	0,00	0,00
60	39	85	0,0087	0,0606	0,0099	221,1000	0	0,00	0,00
61	159	39	0,0073	0,0511	0,0084	221,1000	0	0,00	0,00
62	41	100	0,0046	0,0297	0,0057	221,1000	0	0,00	0,00
63	41	163	0,0032	0,0216	0,0037	221,1000	0	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 43 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
64	41	180	0,0094	0,0608	0,0116	221,1000	0	0,00	0,00
65	44	42	0,0123	0,0854	0,0140	221,1000	0	0,00	0,00
66	181	42	0,0080	0,0558	0,0091	221,1000	0	0,00	0,00
67	43	84	0,0075	0,0513	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
68	43	132	0,0111	0,0755	0,0129	221,1000	0	0,00	0,00
69	44	200	0,0148	0,1012	0,0172	221,1000	0	0,00	0,00
70	46	45	0,0009	0,0492	0,0000	160,0000	33	1,10	0,90
71	55	45	0,0026	0,0185	0,0338	402,3600	0	0,00	0,00
72	102	45	0,0029	0,0207	0,0378	402,3600	0	0,00	0,00
73	45	187	0,0035	0,0248	0,0453	402,3600	0	0,00	0,00
74	61	46	0,0070	0,0486	0,0079	221,1000	0	0,00	0,00
75	122	46	0,0101	0,0654	0,0125	221,1000	0	0,00	0,00
76	47	54	0,0067	0,0456	0,0078	221,1000	0	0,00	0,00
77	47	66	0,0073	0,0474	0,0090	221,1000	0	0,00	0,00
78	49	48	0,0272	0,5320	0,0000	28,9000	33	1,10	0,90
79	50	48	0,0217	0,4042	0,0000	28,7000	33	1,10	0,90
80	51	48	0,0272	0,6127	0,0000	24,3000	33	1,10	0,90
81	52	48	0,0217	0,3798	0,0000	24,3000	33	1,10	0,90
82	53	48	0,0212	0,5766	0,0000	35,3000	33	1,10	0,90
83	48	74	0,0080	0,0544	0,0093	221,1000	0	0,00	0,00
84	54	66	0,0071	0,0455	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
85	56	55	0,0052	0,1247	0,0000	160,0000	33	1,10	0,90
86	81	55	0,0055	0,0391	0,0712	402,3600	0	0,00	0,00
87	55	102	0,0013	0,0089	0,0162	402,3600	0	0,00	0,00
88	55	112	0,0042	0,0298	0,0543	402,3600	0	0,00	0,00
89	55	128	0,0034	0,0244	0,0445	402,3600	0	0,00	0,00
90	56	103	0,0043	0,0298	0,0049	221,1000	0	0,00	0,00
91	57	159	0,0075	0,0514	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
92	95	58	0,0098	0,0635	0,0121	221,1000	0	0,00	0,00
93	177	58	0,0141	0,0960	0,0163	221,1000	0	0,00	0,00
94	59	119	0,0112	0,0724	0,0138	221,1000	0	0,00	0,00
95	59	139	0,0097	0,0624	0,0119	221,1000	0	0,00	0,00
96	60	97	0,0123	0,0793	0,0151	221,1000	0	0,00	0,00
97	134	60	0,0090	0,0628	0,0103	221,1000	0	0,00	0,00
98	61	103	0,0065	0,0456	0,0075	221,1000	0	0,00	0,00
99	159	62	0,0086	0,0590	0,0100	221,1000	0	0,00	0,00
100	160	62	0,0076	0,0531	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
101	63	66	0,0120	0,0832	0,0136	221,1000	0	0,00	0,00
102	63	184	0,0180	0,1160	0,0221	221,1000	0	0,00	0,00
103	65	64	0,0013	0,1016	0,0000	195,5000	33	1,10	0,90
104	67	66	0,0210	0,1448	0,0000	30,0000	33	1,10	0,90
105	68	66	0,0069	0,2650	0,0000	73,0000	33	1,10	0,90
106	69	66	0,0044	0,0950	0,0000	70,5000	33	1,10	0,90
107	70	66	0,0069	0,1995	0,0000	70,5000	33	1,10	0,90
108	71	66	0,0035	0,0815	0,0000	68,0000	33	1,10	0,90
109	72	66	0,0035	0,0746	0,0000	68,0000	33	1,10	0,90
110	73	66	0,0069	0,1464	0,0000	65,0000	33	1,10	0,90
111	66	158	0,0050	0,0323	0,0062	221,1000	0	0,00	0,00
112	74	190	0,0089	0,0608	0,0103	221,1000	0	0,00	0,00
113	76	75	0,0385	0,7843	0,0000	24,3000	33	1,10	0,90
114	77	75	0,0801	2,1921	0,0000	7,4000	33	1,10	0,90
115	78	75	0,0085	0,1814	0,0000	65,0000	33	1,10	0,90
116	79	75	0,0107	0,2778	0,0000	62,1000	33	1,10	0,90
117	108	75	0,0110	0,0710	0,0135	221,1000	0	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 43 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
118	75	157	0,0135	0,0871	0,0166	221,1000	0	0,00	0,00
119	80	100	0,0215	0,1495	0,0244	221,1000	0	0,00	0,00
120	80	143	0,0206	0,1435	0,0235	221,1000	0	0,00	0,00
121	82	81	0,0010	0,0424	0,0000	250,0000	33	1,10	0,90
122	81	178	0,0066	0,0471	0,0859	402,3600	0	0,00	0,00
123	82	195	0,0038	0,0263	0,0045	221,1000	0	0,00	0,00
124	83	146	0,0054	0,0368	0,0063	221,1000	0	0,00	0,00
125	83	186	0,0079	0,0552	0,0090	221,1000	0	0,00	0,00
126	84	113	0,0067	0,0454	0,0077	221,1000	0	0,00	0,00
127	85	120	0,0078	0,0503	0,0096	221,1000	0	0,00	0,00
128	86	101	0,0051	0,0331	0,0063	221,1000	0	0,00	0,00
129	142	86	0,0034	0,0231	0,0039	221,1000	0	0,00	0,00
130	86	193	0,0066	0,0427	0,0081	221,1000	0	0,00	0,00
131	88	87	0,0008	0,0342	0,0000	350,0000	33	1,10	0,90
132	149	87	0,0016	0,0116	0,0211	402,3600	0	0,00	0,00
133	88	150	0,0056	0,0360	0,0069	221,1000	0	0,00	0,00
134	176	88	0,0039	0,0249	0,0048	221,1000	0	0,00	0,00
135	88	194	0,0043	0,0291	0,0050	221,1000	0	0,00	0,00
136	90	89	0,0601	2,2799	0,0000	8,6000	33	1,10	0,90
137	91	89	0,0246	0,5034	0,0000	32,0000	33	1,10	0,90
138	92	89	0,0195	0,3620	0,0000	35,3000	33	1,10	0,90
139	89	95	0,0087	0,0564	0,0108	221,1000	0	0,00	0,00
140	188	89	0,0081	0,0520	0,0099	221,1000	0	0,00	0,00
141	94	93	0,0107	0,2806	0,0000	62,1000	33	1,10	0,90
142	93	191	0,0221	0,1427	0,0272	221,1000	0	0,00	0,00
143	122	96	0,0106	0,0740	0,0121	221,1000	0	0,00	0,00
144	96	143	0,0159	0,1024	0,0195	221,1000	0	0,00	0,00
145	96	188	0,0109	0,0704	0,0134	221,1000	0	0,00	0,00
146	97	200	0,0132	0,0851	0,0162	221,1000	0	0,00	0,00
147	99	98	0,0006	0,0305	0,0000	250,0000	33	1,10	0,90
148	98	123	0,0047	0,0336	0,0612	402,3600	0	0,00	0,00
149	99	142	0,0076	0,0530	0,0087	221,1000	0	0,00	0,00
150	100	174	0,0107	0,0745	0,0122	221,1000	0	0,00	0,00
151	100	179	0,0071	0,0494	0,0081	221,1000	0	0,00	0,00
152	100	184	0,0127	0,0888	0,0145	221,1000	0	0,00	0,00
153	110	101	0,0020	0,0127	0,0024	221,1000	0	0,00	0,00
154	101	117	0,0052	0,0358	0,0061	221,1000	0	0,00	0,00
155	101	141	0,0031	0,0203	0,0039	221,1000	0	0,00	0,00
156	103	102	0,0017	0,0546	0,0000	250,0000	33	1,10	0,90
157	104	102	0,0021	0,0878	0,0000	130,0000	33	1,10	0,90
158	105	102	0,0010	0,0594	0,0000	260,0000	33	1,10	0,90
159	102	128	0,0027	0,0193	0,0352	402,3600	0	0,00	0,00
160	103	106	0,0078	0,0540	0,0088	221,1000	0	0,00	0,00
161	130	106	0,0070	0,0478	0,0081	221,1000	0	0,00	0,00
162	107	113	0,0068	0,0461	0,0078	221,1000	0	0,00	0,00
163	107	129	0,0052	0,0353	0,0060	221,1000	0	0,00	0,00
164	192	107	0,0039	0,0254	0,0049	221,1000	0	0,00	0,00
165	108	198	0,0248	0,1601	0,0306	221,1000	0	0,00	0,00
166	186	109	0,0088	0,0599	0,0102	221,1000	0	0,00	0,00
167	110	193	0,0034	0,0222	0,0042	221,1000	0	0,00	0,00
168	163	111	0,0053	0,0341	0,0065	221,1000	0	0,00	0,00
169	111	175	0,0080	0,0554	0,0091	221,1000	0	0,00	0,00
170	113	112	0,0021	0,0586	0,0000	350,0000	33	1,10	0,90
171	114	112	0,0600	0,4340	0,0000	20,0000	33	1,10	0,90

continua na próxima página

Tabela 43 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
172	115	112	0,0013	0,0628	0,0000	200,0000	33	1,10	0,90
173	128	112	0,0013	0,0093	0,0169	402,3600	0	0,00	0,00
174	113	192	0,0054	0,0350	0,0067	221,1000	0	0,00	0,00
175	117	116	0,0005	0,0349	0,0000	300,0000	33	1,10	0,90
176	133	116	0,0039	0,0278	0,0507	402,3600	0	0,00	0,00
177	117	132	0,0119	0,0830	0,0136	221,1000	0	0,00	0,00
178	117	162	0,0162	0,1044	0,0199	221,1000	0	0,00	0,00
179	131	118	0,0072	0,0464	0,0089	221,1000	0	0,00	0,00
180	118	134	0,0116	0,0808	0,0132	221,1000	0	0,00	0,00
181	118	198	0,0095	0,0648	0,0110	221,1000	0	0,00	0,00
182	122	121	0,0008	0,0630	0,0000	200,0000	33	1,10	0,90
183	121	178	0,0089	0,0636	0,1160	402,3600	0	0,00	0,00
184	187	121	0,0011	0,0076	0,0138	402,3600	0	0,00	0,00
185	124	123	0,0003	0,0175	0,0000	400,0000	33	1,10	0,90
186	125	123	0,0045	0,1046	0,0000	170,0000	33	1,10	0,90
187	126	123	0,0015	0,0660	0,0000	170,0000	33	1,10	0,90
188	127	123	0,0010	0,0317	0,0000	170,0000	33	1,10	0,90
189	123	133	0,0015	0,0104	0,0190	402,3600	0	0,00	0,00
190	156	123	0,0011	0,0080	0,0146	402,3600	0	0,00	0,00
191	124	193	0,0066	0,0458	0,0075	221,1000	0	0,00	0,00
192	129	128	0,0008	0,0445	0,0000	250,0000	33	1,10	0,90
193	128	133	0,0096	0,0683	0,1244	402,3600	0	0,00	0,00
194	130	144	0,0227	0,1580	0,0258	221,1000	0	0,00	0,00
195	134	133	0,0002	0,0133	0,0000	400,0000	33	1,10	0,90
196	135	133	0,0004	0,0335	0,0000	580,0000	33	1,10	0,90
197	136	133	0,0004	0,0275	0,0000	580,0000	33	1,10	0,90
198	156	133	0,0020	0,0140	0,0255	402,3600	0	0,00	0,00
199	134	140	0,0104	0,0714	0,0121	221,1000	0	0,00	0,00
200	134	186	0,0145	0,0934	0,0178	221,1000	0	0,00	0,00
201	138	139	0,0265	0,1845	0,0302	221,1000	0	0,00	0,00
202	138	195	0,0087	0,0564	0,0108	221,1000	0	0,00	0,00
203	141	148	0,0102	0,0658	0,0126	221,1000	0	0,00	0,00
204	141	193	0,0029	0,0187	0,0036	221,1000	0	0,00	0,00
205	162	144	0,0070	0,0485	0,0079	221,1000	0	0,00	0,00
206	145	176	0,0088	0,0601	0,0102	221,1000	0	0,00	0,00
207	185	145	0,0108	0,0755	0,0123	221,1000	0	0,00	0,00
208	147	146	0,0025	0,1018	0,0000	130,6000	33	1,10	0,90
209	146	177	0,0111	0,0771	0,0126	221,1000	0	0,00	0,00
210	150	149	0,0004	0,0203	0,0000	400,0000	33	1,10	0,90
211	151	149	0,0227	0,6255	0,0000	20,0000	33	1,10	0,90
212	152	149	0,0025	0,1417	0,0000	100,0000	33	1,10	0,90
213	153	149	0,0055	0,1846	0,0000	100,0000	33	1,10	0,90
214	154	149	0,0025	0,1029	0,0000	100,0000	33	1,10	0,90
215	155	149	0,0025	0,0998	0,0000	100,0000	33	1,10	0,90
216	185	150	0,0135	0,0919	0,0156	221,1000	0	0,00	0,00
217	194	150	0,0031	0,0214	0,0037	221,1000	0	0,00	0,00
218	157	156	0,0006	0,0457	0,0000	300,0000	33	1,10	0,90
219	161	160	0,0014	0,0803	0,0000	180,2000	33	1,10	0,90
220	160	181	0,0043	0,0294	0,0050	221,1000	0	0,00	0,00
221	164	163	0,0082	0,1130	0,0000	58,1000	33	1,10	0,90
222	165	163	0,0074	0,3017	0,0000	65,0000	33	1,10	0,90
223	166	163	0,0164	0,3821	0,0000	42,0000	33	1,10	0,90
224	167	163	0,0105	0,1965	0,0000	42,0000	33	1,10	0,90
225	168	163	0,0180	0,4910	0,0000	40,0000	33	1,10	0,90

continua na próxima página

Tabela 43 – continuação da página anterior

	de	para	r [p.u]	x [p.u]	bsh [p.u]	Smax [p.u]	ntap	rMtap	rmtap
226	169	163	0,0164	0,3964	0,0000	40,0000	33	1,10	0,90
227	170	163	0,0164	0,3749	0,0000	35,6000	33	1,10	0,90
228	163	179	0,0058	0,0396	0,0067	221,1000	0	0,00	0,00
229	171	190	0,0099	0,0674	0,0115	221,1000	0	0,00	0,00
230	195	171	0,0116	0,0811	0,0133	221,1000	0	0,00	0,00
231	180	172	0,0153	0,1066	0,0174	221,1000	0	0,00	0,00
232	199	172	0,0240	0,1550	0,0296	221,1000	0	0,00	0,00
233	173	174	0,0154	0,0993	0,0189	221,1000	0	0,00	0,00
234	173	175	0,0086	0,0554	0,0106	221,1000	0	0,00	0,00
235	174	188	0,0180	0,1226	0,0209	221,1000	0	0,00	0,00
236	179	178	0,0005	0,0362	0,0000	250,0000	33	1,10	0,90
237	180	191	0,0264	0,1839	0,0301	221,1000	0	0,00	0,00
238	180	199	0,0122	0,0787	0,0150	221,1000	0	0,00	0,00
239	182	181	0,0110	0,2978	0,0000	60,3000	33	1,10	0,90
240	183	181	0,0046	0,1143	0,0000	65,0000	33	1,10	0,90
241	181	194	0,0044	0,0284	0,0054	221,1000	0	0,00	0,00
242	188	187	0,0014	0,0448	0,0000	400,0000	33	1,10	0,90
243	189	187	0,0003	0,0078	0,0000	740,0000	33	1,10	0,90
244	196	195	0,0029	0,0600	0,0000	87,7000	33	1,10	0,90
245	197	195	0,0029	0,1915	0,0000	87,7000	33	1,10	0,90

Fonte: (MATPOWER, 2019)

Tabela 44 – Sistema ACTIVSg200 - Dados das barras

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
1	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	PQ	7,3900	2,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	PQ	1,7000	0,4800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	PQ	7,9500	2,2600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	PQ	23,7400	6,7700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	PQ	42,6800	12,1600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	PQ	0,3000	0,0900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
13	PQ	2,5200	0,7200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
15	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	30,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
16	PQ	44,7600	12,7600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
17	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
18	PQ	0,7100	0,2000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	PQ	0,7700	0,2200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	PQ	1,1300	0,3200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
21	PQ	4,6100	1,3100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
22	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	PQ	1,4100	0,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
24	PQ	2,4000	0,6800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	PQ	1,3500	0,3900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	PQ	2,3300	0,6700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página

Tabela 44 – continuação da página anterior

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
29	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	PQ	59,0900	16,8400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	PQ	0,5100	0,1500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	PQ	6,4400	1,8400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	PQ	20,7600	5,9200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
37	PQ	3,5700	1,0200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
38	PQ	29,8100	8,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
39	PQ	7,4100	2,1100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	PQ	2,0400	0,5800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
41	PQ	38,3400	10,9300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	PQ	10,6200	3,0300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
43	PQ	2,0900	0,5900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44	PQ	4,1500	1,1800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	PQ	6,3400	1,8100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
47	PQ	1,5400	0,4400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	PQ	1,8200	0,5200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,3600	4,5300	-0,5500	2,1100
50	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,3600	4,5300	-0,5500	2,1100
51	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,3600	4,5300	-0,5500	2,1100
52	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,3600	4,5300	-0,5500	2,1100
53	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,7200	9,0700	-1,1100	4,2300
54	PQ	2,6600	0,7600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
55	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
56	PQ	1,3100	0,3700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
57	PQ	2,8200	0,8000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
58	PQ	4,2300	1,2100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
59	PQ	4,7300	1,3500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
60	PQ	3,8000	1,0800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
61	PQ	20,5500	5,8600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
62	PQ	21,4100	6,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
63	PQ	7,9800	2,2700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
64	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
65	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	86,5000	-21,6600	32,0400
66	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
67	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,4100	4,7000	-0,5700	2,1900
68	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
69	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
70	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
71	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
72	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
73	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,3800	27,9200	-3,4100	13,0100
74	PQ	18,7600	5,3500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
75	PQ	3,6000	1,0300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
76	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,2000	4,0000	-0,4400	2,0400
77	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7200	2,4000	-0,2700	1,2200
78	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5,4000	18,0000	-2,0000	9,1600
79	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5,4000	18,0000	-2,0000	9,1600
80	PQ	1,4800	0,4200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
81	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
82	PQ	7,6000	2,1700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
83	PQ	3,1400	0,8900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
84	PQ	3,7500	1,0700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
85	PQ	4,8300	1,3800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página



Tabela 44 – continuação da página anterior

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
86	PQ	8,2500	2,3500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
87	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
88	PQ	49,3400	14,0600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
89	PQ	62,8500	17,9100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9600	3,2000	-0,3600	1,6300
91	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,5000	5,0000	-0,5500	2,5500
92	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,8900	6,3000	-0,7000	3,2100
93	PQ	3,0600	0,8700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5,4000	18,0000	-2,2000	8,3900
95	PQ	3,0000	0,8500	0,0000	30,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
96	PQ	2,9600	0,8400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
97	PQ	7,3300	2,0900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
98	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
99	PQ	12,1700	3,4700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
100	PQ	37,3900	10,6600	0,0000	80,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
101	PQ	0,5200	0,1500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
102	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
103	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
104	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	67,6000	-14,2600	21,0900
105	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	154,8000	-28,5100	42,1700
106	PQ	2,0600	0,5900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
107	PQ	52,5600	14,9800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
108	PQ	9,4200	2,6800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
109	PQ	5,1600	1,4700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
110	PQ	10,8600	3,0900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
111	PQ	8,8200	2,5100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
112	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
113	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
114	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,4000	1,4000	-0,2400	0,3600
115	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	133,5000	-21,6000	31,9500
116	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
117	PQ	34,0800	9,7100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
118	PQ	3,9400	1,1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
119	PQ	17,5500	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
120	PQ	1,8000	0,5100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
121	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
122	PQ	15,4400	4,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
123	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
124	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
125	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	39,0200	130,0500	-15,8700	60,6000
126	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	39,0200	130,0500	-15,8700	60,6000
127	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	39,0200	130,0500	-15,8700	60,6000
128	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
129	PQ	77,2400	22,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
130	PQ	4,4000	1,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
131	PQ	30,2500	8,6200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
132	PQ	26,9600	7,6800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
133	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
134	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
135	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	133,9200	446,4000	-54,4600	208,0200
136	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	133,9200	446,4000	-54,4600	208,0200
137	PQ	1,1600	0,3300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
138	PQ	2,0900	0,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
139	PQ	6,8400	1,9500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
140	PQ	8,2100	2,3400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
141	PQ	1,4200	0,4100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
142	PQ	37,2600	10,6200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página

Tabela 44 – continuação da página anterior

	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAr]	gshb	bshb	Pgm [MW]	PgM [MW]	Qgm [MVAr]	QgM [MVAr]
143	PQ	26,7800	7,6300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
144	PQ	9,0500	2,5800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
145	PQ	17,5400	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
146	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
147	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	92,4000	-14,4700	21,4100
148	PQ	32,0200	9,1300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
149	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
150	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
151	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,6200	5,4000	-0,6600	2,5200
152	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	23,1700	77,2200	-9,4200	35,9900
153	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	23,1700	77,2200	-9,4200	35,9900
154	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	23,1700	77,2200	-9,4200	35,9900
155	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	23,1700	77,2200	-9,4200	35,9900
156	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
157	PQ	14,7600	4,2100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
158	PQ	8,9700	2,5600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
159	PQ	1,3900	0,4000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
160	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
161	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	41,5800	138,6000	-15,3800	70,5500
162	PQ	1,4500	0,4100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
163	PQ	45,8000	13,0500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,6000	12,0000	-1,3300	6,1100
165	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7,8000	26,0000	-2,8900	13,2300
166	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,8200	9,4000	-1,0400	4,7800
167	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,8200	9,4000	-1,0400	4,7800
168	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,8200	9,4000	-1,0400	4,7800
169	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,8200	9,4000	-1,0400	4,7800
170	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,8200	9,4000	-1,0400	4,7800
171	PQ	7,9400	2,2600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
172	PQ	5,3800	1,5300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
173	PQ	8,7100	2,4800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
174	PQ	2,7700	0,7900	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
175	PQ	7,3100	2,0800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
176	PQ	19,0100	5,4200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
177	PQ	11,2900	3,2200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
178	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
179	PQ	23,6100	6,7300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
180	PQ	7,7400	2,2100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
181	PQ	47,9800	13,6700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
182	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5,2500	17,5000	-2,1400	8,1600
183	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7,9800	26,6000	-3,2500	12,4000
184	PQ	10,6900	3,0500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
185	PQ	10,7900	3,0700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
186	PQ	2,1000	0,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
187	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
188	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
189	Vθ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	170,7500	569,1500	-46,6700	209,4500
190	PQ	16,7900	4,7800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
191	PQ	7,2300	2,0600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
192	PQ	52,7400	15,0300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
193	PQ	21,9900	6,2700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
194	PQ	37,5700	10,7100	0,0000	50,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
195	PQ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
196	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	20,2500	67,5000	-7,4900	34,3600
197	PV	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	20,2500	67,5000	-7,4900	34,3600
198	PQ	5,3700	1,5300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
199	PQ	4,2600	1,2100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

continua na próxima página

Tabela 44 – continuação da página anterior

	<b>Tipo</b>	<b>Pd</b> [MW]	<b>Qd</b> [MVAr]	<b>gshb</b>	<b>bshb</b>	<b>Pgm</b> [MW]	<b>PgM</b> [MW]	<b>Qgm</b> [MVAr]	<b>QgM</b> [MVAr]
200	PQ	9,3400	2,6600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: ([MATPOWER](#), 2019)

Tabela 45 – Sistema ACTIVSg200 - Custos dos tipos de gerações elétricas

	$C_{gt_2}$	$C_{gt_1}$	$C_{gt_0}$	$C_{gh_1}$	$C_{gh_0}$	$C_{ge_1}$	$C_{ge_0}$	$C_{gpv_1}$	$C_{gpv_0}$
49	0,0020	19,0000	236,1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	0,0020	19,0000	236,1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
51	0,0020	19,0000	236,1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
52	0,0020	19,0000	236,1200	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
53	0,0020	19,0000	236,2400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
65	0,0020	19,0000	253,0100	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
67	0,0020	19,0000	236,1300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
68	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
69	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
70	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
71	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
72	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
73	0,0020	19,0000	236,7400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
76	0,0020	23,1570	606,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
77	0,0020	23,1460	603,6000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
78	0,0020	23,2520	627,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,0020	23,2520	627,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,0020	23,1520	604,8000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
91	0,0020	23,1640	607,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
92	0,0020	23,1730	609,4500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	0,0020	19,0000	236,4800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
104	0,0020	19,0000	253,0100	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
105	0,0020	19,0000	610,1400	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
114	0,0020	19,0000	236,1300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
115	0,0020	19,0000	610,1400	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
125	0,0020	19,0000	610,1400	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
126	0,0020	19,0000	610,1400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
127	0,0020	19,0000	610,1400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
135	0,0020	19,0000	1261,3300	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
136	0,0020	19,0000	1261,3300	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
147	0,0020	19,0000	610,1400	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
151	0,0020	19,0000	236,1400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
152	0,0020	19,0000	253,0100	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
153	0,0020	19,0000	253,0100	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
154	0,0020	19,0000	253,0100	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
155	0,0020	19,0000	253,0100	13,0000	24,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
161	0,0020	24,0700	807,9000	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	0,0020	23,2110	618,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
165	0,0020	23,3060	639,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
166	0,0020	23,1940	614,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
167	0,0020	23,1940	614,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
168	0,0020	23,1940	614,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
169	0,0020	23,1940	614,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
170	0,0020	23,1940	614,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
182	0,0020	19,0000	236,4700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
183	0,0020	19,0000	236,7100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
189	0,0000	6,7100	1272,1300	26,0000	48,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
196	0,0020	23,5880	701,2500	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000
197	0,0020	23,5880	701,2500	0,0000	0,0000	20,0000	24,0000	35,0000	20,0000

**Fonte:** Adaptado de ([MATPOWER, 2019](#); [CCEE, 2018](#); [LAZARDS, 2018](#))

Tabela 46 – Sistema ACTIVSg200 - Coeficientes de emissões de poluentes das gerações Termoelétricas

	$\alpha_{gt}$	$\beta_{gt}$	$\gamma_{gt}$	$\zeta_{gt}$	$\lambda_{gt}$
49	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
50	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
51	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
52	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
53	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
65	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
67	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
68	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
69	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
70	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
71	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
72	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
73	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
76	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
77	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
78	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
79	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
90	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
91	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
92	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
94	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
104	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
105	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
114	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
115	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
125	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
126	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
127	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
135	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
136	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
147	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
151	6,1310	-5,5550	5,1510	0,000010	6,6670
152	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
153	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
154	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
155	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
161	2,5430	-6,0470	5,6380	0,000500	3,0000
164	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
165	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
166	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
167	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
168	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
169	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
170	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
182	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
183	5,4260	-3,5500	3,3800	0,002000	2,0000
189	4,0910	-5,5540	6,4900	0,000200	2,8570
196	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000
197	4,2580	-5,0940	4,5860	0,000001	8,0000

**Fonte:** Adaptado de ([ARAUJO, 2018](#))

### A.3.1 Modelo estocástico - Sistema ACTIVSg200

Os dados de demanda, velocidade do vento, irradiação solar e temperatura ambiente são apresentados na Tabela (47). Na Tabela (48) apresentam-se as gerações de energia utilizadas na modelagem estocástico.

Tabela 47 – Modelo estocástico - Níveis de demanda, Vel. Vento, Ir. Solar e temperatura ambiente do sistemas ACTIVSg200

Bloco	Demanda		Eólica		Solar		Temp. Amb. [°C]
	Nível[p.u]	Prob	Vel.[m/s]	Prob	Ir. Solar[W/m <sup>2</sup> ]	Prob	
B1 (850 hrs)	1,09	0,30	9,97	0,30	860,90	0,30	32,97
	1,04	0,70	8,05	0,70	224,47	0,24	28,38
					0,00	0,46	23,50
B2 (7150 hrs)	0,99	0,30	10,40	0,30	755,13	0,30	31,89
	0,90	0,70	7,70	0,70	164,70	0,24	26,74
					0,00	0,46	21,99
B3 (760 hr)	0,80	0,30	10,46	0,30	812,49	0,30	32,88
	0,75	0,70	8,06	0,70	213,23	0,25	28,28
					0,00	0,45	23,28

Fonte:

Tabela 48 – Sistemas ACTIVSg200 - Tipos de gerações - Casos E1, E2 e E3

Caso	Termoelétrica	Hidroelétrica	Eólica	Fotovoltaica
E1	Todas barras	-	-	-
E2	Demais barras	65, 104, 105, 115, 125, 135, 136, 147, 153, 155, 161, 189	-	-
E3	Demais barras	65, 104, 105, 115, 125, 135, 136, 147, 153, 155, 161, 189	68, 70, 154, 196	69, 71, 152, 197

Fonte: Próprio Autor

## ANEXO B – DEMANDAS HORÁRIAS VERIFICADAS ONS (2019)

Tabela 49 – Carga Horária verificada por Subsistema de transmissão [*MWh*]

Hora	Sudeste/Centro-Oeste	Sul	Nordeste*	Norte
1	25527,08000	8009,46000	9663,2800	5434,5300
2	24132,59000	7560,87000	9367,1500	5388,0100
3	23460,96000	7340,65000	9195,5900	5323,1200
4	23274,45000	7280,30000	9096,7900	5249,3900
5	23649,22000	7441,12000	9069,7600	5152,700
6	24874,26000	8034,41000	9011,2200	5112,6100
7	26628,31000	9328,72000	8693,3200	4844,9700
8	28005,25000	10599,86000	9146,5900	4785,700
9	30140,82000	11859,88000	9746,6300	5115,6600
10	31630,33000	12421,55000	10018,9400	5308,6800
11	32903,95000	12853,88000	10137,0000	5424,0200
12	33282,11000	12891,01000	10202,5100	5375,0700
13	33041,46000	11651,27000	10022,2700	5346,7300
14	33578,36000	12127,40000	10247,8600	5523,4100
15	33907,47000	12303,78000	10431,3900	5760,9200
16	34116,10000	12324,44000	10392,8500	5769,9800
17	34851,63000	12619,96000	10264,0800	5669,7200
18	35847,77000	12847,60000	10138,0700	5410,4100
19	39003,38000	13772,97000	10355,0400	5310,5900
20	38109,79000	13568,20000	10172,0100	5484,4800
21	36889,52000	13060,16000	10047,8400	5542,8300
22	35807,12000	12760,37000	10368,2200	5673,500
23	33511,11000	11833,64000	10290,3400	5798,5200
24	30484,42000	10350,98000	9924,7600	5730,5300

Fonte:([ONS](#), 2019)