

# Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização do Corte de Carga em Microrredes CA Ilhadas usando a Transformação Unscented

Jurandir Soares de Oliveira \* Wesley Peres \* Lane Maria Rabelo \*

\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL),  
Universidade Federal de São João del-Rei, MG, (e-mails:  
jurandir.oliveira@engenharia.ufjf.br, wesley.peres@ufsj.edu.br,  
rabelo@ufsj.edu.br).

---

**Abstract:** This paper presents a methodology for solving the probabilistic optimal power flow for load shedding minimization in islanded microgrids to frequency limits satisfaction. Here, load uncertainties are considered. The peculiarities of microgrids operating in the islanded control mode are considered, such as the frequency variation and the droop control. The Unscented Transformation is employed, taking into consideration its lower number of samples. Results for a 33-bus microgrid show the accuracy of the results as well as the computational efficiency when compared with the Monte Carlo Simulation.

**Resumo:** Este artigo apresenta uma metodologia de fluxo de potência ótimo probabilístico para a minimização do corte de carga em microrredes ilhadas para a satisfação dos limites de frequência. As peculiaridades da operação ilhada de microrredes são consideradas, tais como a variação da frequência e o controle em *droop* dos geradores. A solução é feita a partir da Transformação Unscented que utiliza um número reduzido de amostras das variáveis incertas quando comparadas com a Simulação Monte Carlo. Resultados para uma microrrede de 33 barras ilustram a efetividade computacional da metodologia proposta bem como a acurácia dos resultados, mostrando que a solução determinística pode não ser eficiente diante das incertezas das cargas.

**Keywords:** Probabilistic Optimal Power Flow; Unscented Transformation; Islanded Microgrids; Load Shedding Minimization; Uncertainties.

**Palavras-chaves:** Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico; Transformação Unscented; Microrredes Ilhadas; Minimização do Corte de Carga; Incertezas.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A definição de microrredes (do inglês, *microgrids*) foi feita por Lopes et al. (2006) como um sistema de baixa ou média tensão composto por geradores distribuídos, sistemas de armazenamento e cargas controláveis. O emprego massivo de sistemas de telecomunicação e de controle nas microrredes fazem com que esses sistemas evoluam para as chamadas *smart grids* (redes inteligentes). As microrredes pode ser sistemas CA, CC ou híbridas e podem operar conectadas à rede principal ou isolados.

Na operação ilhada de microrredes CA, os geradores despacháveis (baseados em combustíveis, tais como microturbinas) operam no modo *droop*, participando do controle de frequência (que varia e pode diferir do valor nominal).

Quando a carga excede um determinado valor, conforme discutido por La Gatta et al. (2019), a microrrede enfrenta problemas de sub-frequência. Diante desse cenário, a definição do local e do montante de carga a ser cortada torna-se uma tarefa importante.

Uma revisão dos esquemas de corte de carga em microrredes ilhadas foi apresentada por Bakar et al. (2017).

La Gatta et al. (2019) apresentaram um Fluxo de Potência Ótimo Determinístico para a minimização do corte de carga considerando o controle em *droop* e a variação da frequência. O emprego de sistemas de armazenamento para a redução do corte de carga foi discutido por Pulendran e Tate (2017).

As metodologias de Fluxo de Potência Ótimo Determinístico, tais como a proposta por La Gatta et al. (2019), mostrou-se eficiente para a minimização do corte de carga para solução do problema de sub-frequência. Entretanto, os resultados podem não ser adequados do ponto de vista probabilístico diante das incertezas das cargas, como discutido por Singh et al. (2022).

Com o objetivo de calcular a solução da rede em regime permanente considerando incertezas, o Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) e o Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico foram propostos na literatura. Borkowska (1974) propôs a primeira metodologia de FPP na literatura em meados da década de setenta. Conforme o trabalho de Singh et al. (2022), os métodos para a solução do FPP e FPO-P podem ser classificados em numéricos, analíticos e aproximados.

## 2. METODOLOGIA PROPOSTA

Os métodos numéricos consistem em gerar uma determinada quantidade de amostras, executar a metodologia determinística para cada amostra e calcular a média e o desvio padrão de cada variável de saída (tensão, corrente, etc.). Não obstante os resultados satisfatórios (usados como *benchmark*), tais métodos demandam grande esforço computacional. Algumas metodologias numéricas para a solução de FPP e FPO-P (no caso a Simulação Monte Carlo) foram propostas por Xie et al. (2018); Abdelaziz (2017).

Os métodos analíticos são computacionalmente eficientes por se basearem em linearizações das equações do fluxo de potência. Apesar da eficiência computacional, tais métodos podem sofrer de imprecisão devido ao processo de linearização considerado. Exemplos de aplicação dessa classe foram propostos por Schellenberg et al. (2005); Zhang e Lee (2004), que utilizam o Método dos Cumulantes.

Por fim, os métodos aproximados são baseados no uso de transformações não lineares aplicados às variáveis de entrada (por exemplo, cargas incertas) para o cálculo das variáveis de saída (tensões, gerações, etc.). Tais métodos se destacam pelo cálculo determinístico de poucas amostras, requerendo um esforço computacional reduzido quando comparado com os métodos numéricos. Entretanto, alguns trabalhos da literatura investigaram que esses métodos podem sofrer de imprecisão na estimação do desvio padrão das variáveis de saída diante de um número elevado de variáveis de entrada. Exemplos desses métodos são: (i) o *Two Point Estimate Method*, investigado por Gallego et al. (2021); Morales e Pérez-Ruiz (2007); Verbic e Cañizares (2006), e (ii) a Transformação Unscented, investigada por Lin et al. (2018); Aien et al. (2012); Peres (2023).

De interesse deste trabalho, ressalta-se que a Transformação Unscented foi aplicada em microrredes ilhadas para a solução do FPP por Lin et al. (2018) e do FPO Probabilístico para a minimização de perdas por Peres (2023). Diante da revisão apresentada, observa-se que o desenvolvimento de uma metodologia para a solução do Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico (FPO-P) para a minimização do corte de carga em microrredes ilhadas é de grande interesse. Assim sendo, este é o principal objetivo do presente trabalho, que apresenta como contribuições e características:

- o FPO-P visa minimizar o corte de carga para a manutenção da frequência entre os seus limites. A formulação contempla o controle em *droop* dos geradores;
- as cargas são modeladas pela distribuição normal;
- a solução é baseada na Transformação Unscented, que permite uma redução significativa do esforço computacional;
- os estudos realizados para uma microrrede de 33 barras mostram que a metodologia de FPO determinístico pode não ser eficiente quando se considera as incertezas das cargas;
- os resultados são comparados com os da Simulação Monte Carlo (SMC), atestando a qualidade dos resultados e a eficiência computacional.

A presente seção apresenta a metodologia proposta para a análise probabilística da solução do fluxo de potência ótimo para a minimização do corte de carga considerando a incerteza da carga.

### 2.1 Característica de Controle em Droop

Na operação ilhada de microrredes em corrente alternada, os geradores podem operar da seguinte forma:

- **Geradores Despacháveis:** são aqueles baseados em combustíveis fósseis (microturbinas, por exemplo) que operam no modo *grid-forming*, participando do controle de frequência (controle em *droop*);
- **Geradores Não-Despacháveis:** são os geradores baseados em fontes renováveis variáveis, tais como eólica e solar. Sem a consideração de sistemas de armazenamento associados à essas unidades, estas não podem ser despachadas. Em alguns trabalhos da literatura, tal como em Peres (2023), considera-se que elas operam no modo *grid-following*, isto é, sem participar do controle de frequência. Nesse caso, como discutido por Aien et al. (2012), estas são modeladas como cargas negativas no sistema, variando com a disponibilidade solar ou de vento. No presente trabalho não se considera geradores dessa natureza nos estudos.

A Figura 1 apresenta a característica de *droop*  $P - f$  e  $Q - V$ . Esse controle é empregado nas unidades de geração despacháveis para a participação no controle de frequência da microrrede. Observa-se que na malha  $P - f$  a frequência da microrrede  $f_{mg}$  é reduzida com o aumento da potência  $P_{gk}$ . O mesmo pode ser observado na malha  $Q - V$ , em que a tensão terminal da unidade  $k$ ,  $V_k$ , é reduzida com o aumento da potência  $Q_{gk}$ . O equacionamento do controle em *droop* será apresentado na próxima subseção.

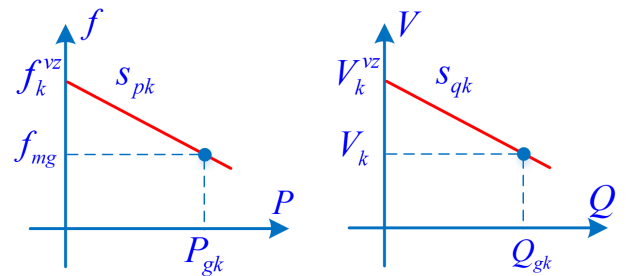


Figura 1. Ilustração do controle em *droop*.

### 2.2 Fluxo de Potência Ótimo Determinístico

A formulação do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (FPO-D) para a minimização do corte de cargas em microrredes ilhadas é apresentada em (1)-(11). O somatório dos fatores de corte de carga ponderados pela carga ativa define a função objetivo em (1). O balanço de potência ativa e reativa em cada barra é garantido por (2)-(3). O modelo matemático do controle em *droop* da Figura 1 é apresentado em (4)-(5). A restrição de referência angular da microrrede é dada em (6). Por fim, os limites das variáveis do problema de otimização são apresentados em (7)-(11).

$$\min \quad F(\mathbf{z}) = \sum_{k \in \Omega_B} \gamma_k P_{dk} \quad (1)$$

$$P_{gk} - (1 - \gamma_k)P_{dk} - P_k = 0, \quad k \in \Omega_B \quad (2)$$

$$Q_{gk} - (1 - \gamma_k)Q_{dk} - Q_k = 0, \quad k \in \Omega_B \quad (3)$$

$$P_{gk} - \frac{1}{s_{pk}} (f_k^* - f_{mg}) = 0, \quad k \in \Omega_G \quad (4)$$

$$Q_{gk} - \frac{1}{s_{qk}} (V_k^* - V_k) = 0, \quad k \in \Omega_G \quad (5)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (6)$$

$$\text{sa} \quad f_{\min} \leq f_{mg} \leq f_{\max} \quad (7)$$

$$V_{k \min} \leq V_k \leq V_{k \max}, \quad k \in \Omega_B \quad (8)$$

$$P_{gk \min} \leq P_{gk} \leq P_{gk \max}, \quad k \in \Omega_G \quad (9)$$

$$Q_{gk \min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk \max}, \quad k \in \Omega_G \quad (10)$$

$$0 \leq \gamma_k \leq 1, \quad k \in \Omega_B \quad (11)$$

em que:

- $\Omega_B$  e  $\Omega_G$  são os conjuntos de barras e geradores da microrrede;
- $\gamma_k$  é o coeficiente de corte de carga na barra  $k$ ;
- $P_{gk}$  e  $Q_{gk}$  são as potências ativa e reativa geradas na barra  $k$ . Na ausência de unidade geradora na barra  $k$ ,  $P_{gk} = Q_{gk} = 0$ ;
- $P_{dk}$  e  $Q_{dk}$  são as potências ativa e reativa demandadas na barra  $k$ ;
- $P_k$  e  $Q_k$  são as injeções de potência ativa e reativa na barra  $k$  calculadas com base nas tensões complexas nodais e na matriz admitância de barras, conforme demonstrado por Gómez-Expósito et al. (2016);
- $f_{mg}$  é a frequência da microrrede;
- $V_k$  é a magnitude da tensão nodal na barra  $k$ ;
- $f_k^*$  e  $V_k^*$  são os valores à vazão de frequência e tensão do controle em *droop* na Figura 1. Esses valores são fixos;
- $s_{pk}$  e  $s_{qk}$  são os valores dos coeficientes da curva de *droop* na Figura 1. Esses valores são fixos;
- os índices  $\min$  e  $\max$  denotam os limites mínimo e máximo de cada variável;
- $F(\mathbf{z})$  denota a função objetivo;
- $\mathbf{z}$  denota o vetor de variáveis de otimização composto por: potências geradas, tensões nodais, frequência da microrrede e coeficientes de corte de carga.

### 2.3 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico baseado na Transformação *Unscented*

Nesse trabalho considera-se que as cargas (ativa e reativa) são modeladas por (12):

$$\mathbf{x} \sim N(\mathbf{x}_m, \mathbf{P}_x) \quad (12)$$

em que:

- $N$  denota a distribuição normal;
- $\mathbf{x}$  é o vetor de cargas ativas e reativas ( $n \times 1$ ) ( $n = 2 \times nb$ , sendo  $nb$  o número de barras);

•  $\mathbf{x}_m$  é o vetor com a média das variáveis (neste trabalho, o valor nominal das cargas);

•  $\mathbf{P}_x$  é a matriz covariância ( $n \times n$ ), usada na modelagem da incerteza da carga. Nesse trabalho não é considerada correlação entre as variáveis.

Deseja-se calcular a média e a variância das seguintes variáveis do sistema através de (13), sabendo que as cargas seguem a distribuição normal descrita em (12): potências geradas, tensões nodais, frequência da microrrede e coeficientes de corte de carga.

$$\mathbf{y} = g(\mathbf{x}) \quad (13)$$

em que:

•  $\mathbf{y}$  é o vetor com as grandezas de interesse: potências geradas, tensões nodais, frequência da microrrede e coeficientes de corte de carga;

•  $g(\mathbf{x})$  é uma função não linear (no caso, o fluxo de potência ótimo determinístico descrito na Seção 2.2).

Proposta por Julier e Uhlmann (2004), a Transformação *Unscented* tem como princípio obter um conjunto de vetores denominados de *sigma points*, deterministicamente definidos, que capturam a média e a covariância de  $\mathbf{x}$ . Os *sigma points* são então aplicados na função não-linear  $g(\mathbf{x})$  para a estimação da média e covariância de  $\mathbf{y}$ .

Inicialmente, deve-se definir um conjunto de  $2n + 1$  *sigma points*  $\chi_i$  (vetores coluna de ordem  $n \times 1$ ) e seus respectivos pesos  $W_i$  (existem  $2n + 1$  pesos, um para cada  $\chi_i$ ). Os vetores  $\chi_i$  são definidos conforme (14)-(16).

$$\chi_1 = \mathbf{x}_m \quad (14)$$

$$\chi_{i+1} = \mathbf{x}_m + \mathbf{u}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$\chi_{i+n+1} = \mathbf{x}_m - \mathbf{u}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

em que  $\mathbf{u}_i$  é um vetor linha da matriz  $\mathbf{U}$  obtido a partir da fatoração de Cholesky como apresentado em (17).

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = (n + \kappa) \mathbf{P}_x \quad (17)$$

No trabalho proposto por Valverde e Terzija (2011), discute-se que o parâmetro  $\kappa$  é escolhido empiricamente para reduzir os erros de estimação da média e covariância. No presente trabalho, de forma similar ao feito por Aien et al. (2012), adota-se  $\kappa = 2$ , que é um valor comumente empregado na literatura e que apresentou bons resultados quando comparados com os da SMC.

Os pesos  $W_i$  são calculados conforme (18)-(20).

$$W_1 = \frac{\kappa}{n + \kappa} \quad (18)$$

$$W_{i+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, \quad i = 1, \dots, n \quad (19)$$

$$W_{i+n+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, i = 1, \dots, n \quad (20)$$

É importante mencionar que cada *sigma point*  $\chi_i$  representa um vetor coluna ( $n \times 1$ ) com os valores de carga ativa e reativa nos barramentos ( $n = 2 \times nb$ ). Para cada  $\chi_i$ , aplica-se a função não linear  $\mathbf{y}_i = g(\chi_i)$ , sendo  $\mathbf{y}_i$  o vetor com as grandezas de interesse e  $g(\chi_i)$  o fluxo de potência ótimo determinístico.

Uma vez calculados os  $2n + 1$  vetores  $\mathbf{y}_i$  pode-se estimar a média e a covariância para cada variável de interesse conforme (21) e (22).

$$\mathbf{y}_m = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \mathbf{y}_i \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_y = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \left[ (\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_m) (\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_m)^T \right] \quad (22)$$

Ressalta-se que a UT utiliza um conjunto de *sigma points* que não são randomicamente escolhidos tal como ocorre na Simulação Monte Carlo (SMC). Tal premissa faz com que a UT forneça uma adequada informação sobre a distribuição de  $\mathbf{x}$ , mesmo com um número reduzido de pontos.

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Descrição do Sistema

As análises do presente trabalho serão conduzidas para uma microrrede de 33 barras. Os dados originais (cargas nos barramentos e impedância dos ramos) estão disponíveis no trabalho de Baran e Wu (1989). O ilhamento ocorre a partir da desconexão entre os nós 33 (subestação) e 1, conforme ilustrado na Figura 2. As bases de potência, tensão e frequência são de 1MVA, 12,66kV e 60Hz. Adota-se a barra 1 como a referência angular. No ponto de operação nominal, considerado neste estudo, as potências demandadas totais são de 3,715 MW e 2,3 Mvar. Consideram-se três unidades de geração despacháveis operando em *droop* alocadas na microrrede, nas barras 2, 12 e 29. Os parâmetros das curvas de *droop* (Figura 1) são similares para todas as unidades e foram considerados iguais a:  $s_{pk} = 0,002\text{pu}$ ,  $s_{qk} = 0,002\text{pu}$ ,  $f_k^* = 60\text{Hz}$  e  $V_k^* = 1,01\text{pu}$ . Os limites das variáveis de otimização são apresentados na Tabela 1.

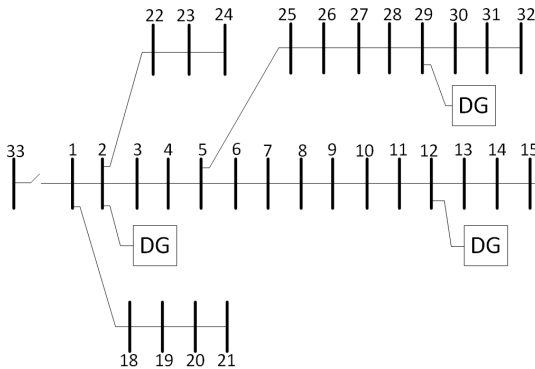


Figura 2. Diagrama unifilar da microrrede de 33 barras.

Tabela 1. Limites das variáveis

Variável	min	max
$f_{mg}$ (Hz)	59,9	60,1
$P_{gk}$ (MW)	0	1,5
$Q_{gk}$ (Mvar)	-2,0	2,0
$V_k$ (pu)	0,9	1,1

#### 3.2 Solução do Fluxo de Potência Determinístico

Nessa seção resolve-se o fluxo de potência proposto por La Gatta et al. (2019). A formulação consiste nas restrições de igualdade de (1)-(11) reescritas conforme (23)-(27). Nesse caso, resolve-se o fluxo de potência com controle em *droop* para o carregamento original do sistema.

$$P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0, \quad k \in \Omega_B \quad (23)$$

$$Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k = 0, \quad k \in \Omega_B \quad (24)$$

$$P_{gk} - \frac{1}{s_{pk}} (f_k^* - f_{mg}) = 0, \quad k \in \Omega_G \quad (25)$$

$$Q_{gk} - \frac{1}{s_{qk}} (V_k^* - V_k) = 0, \quad k \in \Omega_G \quad (26)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (27)$$

A solução do fluxo de potência é apresentada na Tabela 2. Embora os limites das gerações e tensões (apresenta-se somente os valores mínimo e máximo) estejam na faixa permitida pelos limites da Tabela 1, a frequência igual a 59,849 Hz não respeita o limite mínimo de 59,9 Hz. Nesse sentido, um procedimento de corte de carga deve ser realizado.

Tabela 2. Solução do fluxo de potência convencional

Variável	Valor	Variável	Valor
$P_{g2}$ (MW)	1,2555	$Q_{g2}$	1,8506
$P_{g12}$ (MW)	1,2555	$Q_{g12}$	-0,1930
$P_{g29}$ (MW)	1,2555	$Q_{g29}$	0,6801
$V_{min}$ (pu)	0,9930	$V_{max}$ (pu)	1,0104
$f_{mg}$ (Hz)	59,8490	-	-

#### 3.3 Solução do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico

O Fluxo de Potência Ótimo Determinístico apresentado na Seção 2.2 é executado para a minimização do corte de carga e os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Observa-se, na Tabela 3, que a frequência atingiu o limite mínimo de 59,9 Hz. Isto era esperado tendo em vista que deseja-se o mínimo corte de carga para satisfazer os limites de frequência. Os montantes absolutos e percentuais de corte de carga e de carga remanescente são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3. Solução do fluxo de potência ótimo determinístico

Variável	Valor	Variável	Valor
$P_{g2}$ (MW)	0,8373	$Q_{g2}$ (Mvar)	0,6982
$P_{g12}$ (MW)	0,8373	$Q_{g12}$ (Mvar)	0,1442
$P_{g29}$ (MW)	0,8373	$Q_{g29}$ (Mvar)	0,8532
$V_{min}$ (pu)	1,0032	$V_{max}$ (Mvar)	1,0097
$f_{mg}$ (Hz)	59,90	-	-

Uma análise que deve ser realizada é como se comporta a solução determinística (coeficientes de corte de carga)

Tabela 4. Solução Determinística do FPO: Montante de Cargas

Variável	Valor Absoluto	Porcentagem (%)
Corte em MW (%)	1,2120	32,62
Restante em MW (%)	2,5030	67,38
Corte em Mvar (%)	0,6117	26,60
Restante em Mvar (%)	1,6883	73,40

diante da incerteza da carga. Para isso, o Fluxo de Potência Probabilístico baseado na Simulação Monte Carlo discutido em Peres (2023) será utilizado. Nesse caso, a SMC emprega o Fluxo de Potência formulado em (23)-(27). São consideradas 5000 amostras de carga e, para cada amostra, executa-se o fluxo de potência (23)-(27). Ao final, calcula-se a média e o desvio padrão das variáveis de interesse. Para a solução probabilística,  $P_{dk}$  e  $Q_{dk}$  são atualizados a partir dos coeficientes de corte de carga calculados pelo FPO-Determinístico. Em outras palavras, deseja-se calcular a média e o desvio padrão da frequência considerando o corte de carga realizado deterministicamente. As cargas são modeladas com média igual ao valor pós-corte e desvio padrão igual à 10% da média.

Os resultados da Simulação Monte Carlo são apresentados na Tabela 5, em termos de média e desvio-padrão. A forma mais efetiva de analisar esses resultados é calcular a probabilidade de satisfação aos limites, conforme discutido por Peres (2023), o que será feito somente para a frequência a partir dos valores estatísticos calculados. A probabilidade é apresentada em (28), que é um valor relativamente baixo, mostrando que o FPO determinístico pode não ser eficiente (como não foi nesse caso).

$$Pr \{59,90 \leq f_{mg} \leq 60,10\} = 39.42\% \quad (28)$$

Tabela 5. Avaliação probabilística da solução determinística

Variável	Média	Desvio Padrão
$f_{mg}$ (Hz)	59,89900	0,0020817
$P_{g2}$ (MW)	0,83799	0,017348
$P_{g12}$ (MW)	0,83799	0,017348
$P_{g29}$ (MW)	0,83799	0,017348
$Q_{g2}$ (Mvar)	0,69813	0,026275
$Q_{g12}$ (Mvar)	0,14383	0,0242
$Q_{g29}$ (Mvar)	0,85431	0,057838

O tempo computacional requerido foi 39,422 minutos em um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16 GB of RAM e sistema operacional Windows 10 64-bit. Nessa análise não utilizou-se a Transformação Unscented, o que será feito na próxima seção.

### 3.4 Solução do Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico

A metodologia probabilística proposta na Seção 2.3 é aplicada para a minimização do corte de carga. A solução obtida pela Transformação Unscented é comparada com a solução da SMC considerando 1000, 3000 e 5000 amostras. Ao contrário da seção anterior, executa-se um Fluxo de Potência Ótimo Determinístico para a avaliação de cada amostra. Nesse caso, o esforço computacional será bem maior (considerando a SMC) que os 40 minutos requeridos anteriormente, justificando a proposição do FPO Probabilístico via Transformação Unscented.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 6 a 9 e sumarizados abaixo:

- a definição do número de amostras da SMC foi feita de forma empírica. Observa-se que resultados semelhantes foram obtidos para 1000 e 5000 amostras devido à randomicidade da técnica;
- de forma geral, a UT e a SMC fornecem resultados próximos para as médias;
- observa-se um maior erro para o desvio padrão. Para a frequência, tal variação (em relação à SMC) ocasionou uma sobrestimação da probabilidade de satisfação aos limites. Entretanto, a diferença pode ser reduzida pela calibração do parâmetro  $\kappa$  da UT;
- ao contrário do FPO determinístico, a metodologia probabilística apresenta uma solução com boa probabilidade de satisfação aos limites de frequência. Entretanto, recorda-se que os coeficientes de corte de carga são probabilísticos (com média e desvio padrão), cabendo o operador selecionar os casos mais promissores e fazer as validações correspondentes.

Por fim, a Tabela 10 apresenta o esforço computacional. Como esperado, o FPO baseado na UT requer um tempo computacional reduzido em relação à SMC.

Tabela 6. Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência

	UT	SMC		
		1000	3000	5000
Média	59,9000	59,9000	59,9000	59,9000
Desvio Padrão ( $\times 10^{-5}$ )	0,4018	0,8133	0,7539	0,8133
Probabilidade (%)	92,0510	82,9167	84,1102	82,9167

Tabela 7. Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Ativa Gerada (MW)

		UT	SMC		
			1000	3000	5000
Média	$P_{g2}$	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
	$P_{g12}$	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
	$P_{g29}$	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
Desvio Padrão ( $\times 10^{-3}$ )	$P_{g2}$	0,1244	0,2470	0,2290	0,2470
	$P_{g12}$	0,1281	0,2553	0,2365	0,2553
	$P_{g29}$	0,1257	0,2502	0,2320	0,2502

Tabela 8. Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Reativa Gerada (Mvar)

		UT	SMC		
			1000	3000	5000
Média	$Q_{g2}$	0,6845	0,7017	0,7009	0,7017
	$Q_{g12}$	0,1544	0,1443	0,1457	0,1443
	$Q_{g29}$	0,8599	0,8475	0,8502	0,8475
Desvio Padrão	$Q_{g2}$	0,0516	0,0786	0,0729	0,0786
	$Q_{g12}$	0,0340	0,0479	0,0442	0,0479
	$Q_{g29}$	0,0626	0,0676	0,0667	0,0676

Tabela 9. Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar)

		UT	SMC		
			1000	3000	5000
Potência Ativa	Média	1,2117	1,2154	1,2143	1,2154
Potência Reativa	Desvio Padrão	0,0833	0,0820	0,0837	0,0820
Potência Ativa	Média	0,6083	0,6114	0,6105	0,6114
Potência Reativa	Desvio Padrão	0,0357	0,0378	0,0378	0,0378

Tabela 10. Resultado do FPO Probabilístico:  
Análise do Esforço Computacional

UT (min)	SMC (horas)		
	1000	3000	5000
10,49	1,21	3,72	5,38

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentou-se uma metodologia para a solução do Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico resolvido pela Transformação Unscented. A metodologia visou à minimização do corte de carga em microrredes ilhadas para solução do problema de sub-frequência diante da incerteza das cargas. No estudo de caso conduzido para a microrrede de 33 barras, observou-se que a solução do FPO Determinístico atendia à restrição de frequência com uma probabilidade de 39,4 %. Por outro, a metodologia proposta atende à mesma restrição com uma probabilidade próxima à 90%. Comparada com a Simulação Monte Carlo, observou-se uma expressiva redução do esforço computacional, a proximidade entre os valores estimados para as médias e uma pequena diferença na estimação do desvio padrão (que deve ser reduzida em trabalhos futuros).

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INERGE, ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG. Agradecimentos ao programa de pós-graduação PPGEL/UFSJ também são prestados.

#### REFERÊNCIAS

- Abdelaziz, M. (2017). GPU-OpenCL accelerated probabilistic power flow analysis using Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research*, 147. doi:10.1016/j.epsr.2017.02.022.
- Aien, M., Fotuhi-Firuzabad, M., e Aminifar, F. (2012). Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2233–2241. doi:10.1109/TPWRS.2012.2191804.
- Bakar, N.N.A., Hassan, M.Y., Sulaima, M.F., Mohd Nasir, M.N.i., e Khamis, A. (2017). Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review. doi:10.1016/j.rser.2016.12.049.
- Baran, M. e Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1401–1407. doi:10.1109/61.25627.
- Borkowska, B. (1974). Probabilistic load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93(3), 752–759. doi:10.1109/TPAS.1974.293973.
- Gallego, L.A., Franco, J.F., e Cordero, L.G. (2021). A fast-specialized point estimate method for the probabilistic optimal power flow in distribution systems with renewable distributed generation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 131. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107049.
- Gómez-Expósito, A., Conejo, A.J., e Cañizares, C. (2016). *Electric energy systems: Analysis and operation*. doi:10.1201/9781420007275.
- Julier, S.J. e Uhlmann, J.K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. In *Proceedings of the IEEE*, volume 92, 401–422. doi:10.1109/JPROC.2003.823141.
- La Gatta, P.O., Passos Filho, J.A., e Pereira, J.L.R. (2019). Tools for handling steady-state under-frequency regulation in isolated microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 13(4), 609–617. doi:10.1049/iet-rpg.2018.5172.
- Lin, X., Shu, T., Tang, J., Yang, Y., Liu, F., Zheng, J., e Peng, S. (2018). An Unscented Transformation Based Probabilistic Power Flow for Autonomous Hybrid AC/DC Microgrid with Correlated Uncertainty Sources. In *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1–6. IEEE. doi:10.1109/EI2.2018.8582513. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8582513/>.
- Lopes, J., Moreira, C., e Madureira, A. (2006). Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 916–924. doi:10.1109/TPWRS.2006.873018.
- Morales, J.M. e Pérez-Ruiz, J. (2007). Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1594–1601. doi:10.1109/TPWRS.2007.907515.
- Peres, W. (2023). Probabilistic Optimal Power Flow for Balanced Islanded Microgrids. *IEEE Latin America Transactions*, 21(1), 167–174. doi:10.1109/TLA.2023.10015139.
- Pulendran, S. e Tate, J.E. (2017). Energy storage system control for prevention of transient under-frequency load shedding. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(2). doi:10.1109/TSG.2015.2476963.
- Schellenberg, A., Rosehart, W., e Aguado, J. (2005). Cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF) with Gaussian and Gamma distributions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 773–781. doi:10.1109/TPWRS.2005.846184.
- Singh, V., Moger, T., e Jena, D. (2022). Uncertainty handling techniques in power systems: A critical review. *Electric Power Systems Research*, 203. doi:10.1016/j.epsr.2021.107633.
- Valverde, G. e Terzija, V. (2011). Unscented Kalman filter for power system dynamic state estimation. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5(1), 29–37. doi:10.1049/iet-gtd.2010.0210.
- Verbic, G. e Cañizares, C.A. (2006). Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4), 1883–1893. doi:10.1109/TPWRS.2006.881146.
- Xie, Z.Q., Ji, T.Y., Li, M.S., e Wu, Q.H. (2018). Quasi-Monte Carlo Based Probabilistic Optimal Power Flow Considering the Correlation of Wind Speeds Using Copula Function. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2). doi:10.1109/TPWRS.2017.2737580.
- Zhang, P. e Lee, S.T. (2004). Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 676–682. doi:10.1109/TPWRS.2003.818743.