

Cálculo dos fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil

Introdução

Os fatores de emissão de CO₂ resultantes da geração de energia elétrica verificada no **Sistema Interligado Nacional (SIN)** do Brasil são calculados a partir dos registros de geração das usinas despachadas centralizadamente pelo **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)** e, em especial, nas usinas termoeletricas. Essas informações são necessárias aos projetos de energia renovável conectados à rede elétrica e implantados no Brasil no âmbito do **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)** do Protocolo de Quioto.

A sistemática de cálculo dos fatores de emissão de CO₂ foi desenvolvida em cooperação entre o **Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT)** e o **Ministério de Minas e Energia (MME)**, tendo como base as diretrizes da metodologia ACM0002, aprovada pelo Conselho Executivo do MDL, em Bonn, Alemanha. Coube ao **ONS** explicitar ao grupo as práticas operativas do SIN, reguladas pela ANEEL.

Seguindo essa sistemática, os fatores de emissão de CO₂ passaram a ser calculados pelo **ONS** para os quatro submercados do SIN (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul) a partir de janeiro de 2006 e, assim, passam a ser consultados pelo público interessado e investidores.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), parte integrante do Protocolo de Quioto, permite que projetos realizados nos países em desenvolvimento, como o Brasil, possam gerar reduções certificadas de emissões (RCEs), os chamados “créditos de carbono”. Um projeto para se qualificar como projeto de MDL precisa cumprir uma série de exigências dentre as quais seguir estritamente uma metodologia aprovada pelo Conselho Executivo do MDL.

Os projetos que ofertam energia elétrica para a rede ou que reduzem ou eliminam o consumo de energia da rede devem utilizar o fator de emissão de CO₂ associado à rede para calcular as reduções obtidas com a implantação do projeto.

O presente manual apresenta o cálculo dos fatores de emissão do CO₂ associados à geração de energia elétrica no SIN. A metodologia utilizada nesse cálculo é a “**Metodologia consolidada de linha de base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis**” - Metodologia ACM0002.¹

Na primeira parte deste documento são apresentadas a metodologia e as hipóteses adotadas. Na segunda parte, são descritos, passo a passo, os cálculos elaborados para a obtenção dos fatores de emissão publicados.

¹ O cálculo apresentado baseia-se na versão 6 da metodologia ACM0002, de 19 de maio de 2006. As metodologias são frequentemente atualizadas e esse processo pode ser acompanhado no seguinte site: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/AS1DOF3L010BY57ZT2UZNQ8Y9K83CN/view.html>

Descrição Geral da Metodologia

A metodologia ACM0002 se aplica às atividades de projetos de geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis de energia². Há vários tamanhos e subtipos diferentes dessa atividade de projeto (usinas hidrelétricas a fio de água; projetos de energia hidrelétrica com reservatórios existentes em que o volume do reservatório não aumente, novos projetos hidrelétricos com reservatórios com densidades de potência (capacidade instalada de geração elétrica dividida pela área da superfície no nível máximo do reservatório) superiores a 4 W/m²; fontes de energia eólica, geotérmica, solar, marés e ondas). De forma geral, as reduções de emissão de CO₂ de um projeto são calculadas multiplicando-se a energia líquida fornecida pela atividade do projeto para a rede interligada pelo fator de emissão da linha de base.

Fator de emissão da linha de base

A emissão da linha de base visa estimar as emissões que ocorreriam na ausência do projeto de MDL. Essa emissão é calculada como uma margem combinada (CM), que compreende dois componentes: a “margem de construção (BM)” e a “margem de operação (OM)”. A margem de construção visa avaliar a contribuição das usinas que seriam construídas caso o projeto não existisse. A margem de operação visa avaliar a contribuição das usinas que seriam despachadas na ausência da geração do projeto.

Os cálculos para essa margem combinada devem basear-se em dados de uma fonte oficial, de preferência o centro de despacho, que é o caso do ONS. Os acréscimos de capacidade e os valores gerados das usinas elétricas registradas como projetos de MDL devem ser excluídos de todos os cálculos.

1) Cálculo dos fatores de emissão da margem de operação

Os fatores de emissão da margem de operação (OM) devem ser calculados com base em um dos quatro métodos descritos na metodologia ACM0002: OM simples, OM simples ajustada, OM média ou **OM por análise dos dados do despacho**.

O método de cálculo por análise dos dados do despacho é o método mais acurado e, portanto, o recomendado se estiverem disponíveis as informações necessárias, e por isso, é o método adotado aqui.

O fator de emissão da OM por análise dos dados de despacho é definido como a média ponderada dos fatores de emissão das usinas que compõem os 10% superiores da curva de prioridade de despacho e é calculado para cada hora.

O fator de emissão de cada usina existente no sistema é calculado anualmente, a partir dos valores de geração e consumo de combustíveis da usina do ano anterior. Para as novas usinas térmicas que entrem em operação a cada ano, deverá ser adotado como seu fator de emissão, para o correspondente ano, o valor referente ao do ano anterior de uma usina similar.

2) Cálculo do fator de emissão da margem de construção

O fator de emissão da margem de construção (BM) deve ser calculado como o fator de emissão médio ponderado do conjunto *M* de usinas mais recentemente construídas. O conjunto *M* é constituído pelas usinas mais recentes que compreendam 20% da geração anual do sistema, ou pelas 5 usinas mais recentes no caso dessas serem responsáveis por mais de 20% da geração do sistema.

O fator BM é calculado e disponibilizado anualmente.

² As condições de aplicabilidade desta metodologia estão descritas de forma detalhada no documento referido na nota anterior a esta.

Os projetos de MDL têm duas opções de utilização do fator BM. Ele pode ser calculado ex-ante quando da submissão do projeto, ou ex-post para cada ano em que a geração do projeto ocorrer.

3) Cálculo do fator de emissão da linha de base

O fator de emissão da linha de base é calculado como a média ponderada do fator de emissão da margem de operação e do fator de emissão da margem de construção. Os pesos, por padrão, são 0,5 para a OM e 0,5 para a BM. Para projetos de energia eólica e solar podem ser adotados os pesos 0,75 para a OM e 0,25 para a BM. Pesos diferentes podem ser utilizados em casos especiais com justificativa adequada.

Os pesos adotados devem ser fixados para um período de obtenção de créditos e podem ser revistos na renovação do período de obtenção de créditos.

Definição de Sub-Sistema

O cálculo da margem de construção (BM) e da margem de operação (OM) deve ser feito para o sistema elétrico em que o projeto de MDL será implantado. O **sistema elétrico do projeto** é definido pelo conjunto de usinas que possam ser despachadas sem restrições significativas de transmissão. De forma similar, um **sistema elétrico conectado** ao sistema do projeto é definido como um sistema elétrico conectado por linhas de transmissão ao sistema elétrico do projeto, em que as usinas podem ser despachadas sem restrições significativas de transmissão.

A metodologia ACM0002 recomenda que a Autoridade Nacional Designada estabeleça a delimitação dos sistemas elétricos no país. Dessa forma, utiliza-se a definição legal utilizada pelo ONS para o SIN, que define os submercados: Norte (interligado); Nordeste; Sudeste/Centro-Oeste; Sul.

As transferências de eletricidade dos sistemas elétricos conectados para o sistema elétrico do projeto são definidas como **importações de energia** e as transferências de eletricidade para os sistemas elétricos conectados são definidas como **exportações de energia**.

Para determinar o fator de emissão da **margem de operação (OM)** deve-se usar uma das seguintes opções para determinar o(s) fator(es) de emissão de CO₂ para as importações líquidas de eletricidade da rede a partir de um sistema elétrico conectado dentro do mesmo país anfitrião:

- (a) 0 tCO₂/MWh, ou
- (b) o(s) fator(es) de emissão da(s) usina(s) de energia específica(s) da(s) qual(is) a eletricidade é importada, somente se as usinas específicas forem claramente conhecidas, ou
- (c) a taxa média de emissão da rede de exportação, somente se as importações líquidas não excederem 20% da geração total do sistema elétrico do projeto, ou
- (d) o fator de emissão da rede exportadora, determinado utilizando a margem combinada conforme descrito, se as importações líquidas excederem 20% da geração total do sistema elétrico do projeto.

Para o sistema interligado brasileiro adotou-se a opção (c) com a taxa média mensal de emissão de cada subsistema calculada considerando o sistema como isolado dos demais.

Para as importações do sistema elétrico conectado localizado em outro país, o fator de emissão é 0 tonelada de CO₂ por MWh.

As exportações de energia não devem ser subtraídas dos dados de geração de eletricidade usados para calcular os fatores de emissões da linha de base.

Para determinar o fator de emissão da **margem de construção (BM)** a extensão espacial se limita ao sistema elétrico do projeto.

Descrição Detalhada da Metodologia

1) Definição das variáveis

a) Índices utilizados:

y : ano

m : mês

h : hora

s : submercado

\bar{s} : submercado do projeto

i : tipo de projeto

\bar{i} : tipo do projeto

j : usina

c : combustível

b) Variáveis utilizadas:

U_c : Unidade de medida do combustível c

FC_c : Fator de emissão de CO_2 por quantidade de combustível c consumido (tCO_2/U_c)

CE_c : Conteúdo de energia por unidade de combustível c (TJ/U_c)

FE_c : Fator de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível c (tC/TJ)

OX_c : Fator de oxidação do combustível c (adimensional)

FT_{jy} : Fator de emissão de CO_2 por quantidade de energia gerada pela usina j no ano y (tCO_2/MWh)

CC_{cjy} : Consumo de combustível c pela usina j no ano y (U_c)

G_{jy} : Geração de energia elétrica pela usina j no ano y (MWh)

D_{jh} : Geração de energia elétrica pela usina j na hora h (MWh)

$I_{ss'h}$: Transmissão de energia elétrica do sistema s para o sistema s' na hora h (MWh)

P_{jh} : Fração da geração da usina j na hora h contida nos 10% superiores da ordem de despacho (adimensional)

CG_{jm} : Custo de Geração da usina j no mês m (R\$)

OM_{sh} : Fator de emissão da margem de operação para o sistema s na hora h (tCO_2/MWh)

\overline{OM}_{sm} :	Fator de emissão médio da margem de operação para o sistema s no mês m hora h, considerando-se apenas a geração das usinas do sistema s (tCO ₂ /MWh)
R_{jy}	Fração da usina j contida nos 20% mais novos de capacidade instalada, avaliada para o ano y
GP_h :	Geração de energia elétrica do projeto na hora h (MWh)
BM_{sy}	Fator de emissão da margem de construção para o sistema s no ano y (tCO ₂ /MWh)
FO_y :	Fator de emissão de linha de base associado à margem de operação no ano y (tCO ₂ /MWh)
FC_y :	Fator de emissão de linha de base associado à margem combinada no ano y (tCO ₂ /MWh)
WO_i :	Valor de ponderação da margem de operação para um projeto do tipo i (adimensional)

2) Cálculo do fator de emissão de CO₂ por tipo de combustível

As usinas térmicas emitem CO₂ pela queima de combustível fóssil. O fator de emissão de CO₂ por unidade de combustível consumido é calculado com base no poder calorífico dos combustíveis e em fatores de emissão por unidade de energia, conforme a equação a seguir:

$$FC_c = CE_c \times FE_c \times OX_c \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

3) Cálculo do fator de emissão de CO₂ por usina termelétrica

O fator de emissão de CO₂ por quantidade de energia gerada por cada termelétrica é função das quantidades de combustível consumidas por energia gerada e dos fatores de emissão por tipo de combustível. Em alguns tipos de usinas termelétricas podem ser consumidos vários tipos de combustíveis. O fator de emissão é calculado anualmente conforme a equação a seguir:

$$FT_{jy} = \frac{\sum [CC_{c_jy} \times FC_c]}{G_{jy}} \quad (2)$$

4) Cálculo do fator de emissão da margem de operação

O fator de emissão da margem de operação (OM) é calculado para cada submercado e cada hora, a partir do valor de energia despachada de cada usina, dos custos de geração de cada usina (prioridade de despacho), dos intercâmbios horários com os submercados vizinhos e dos fatores de emissão das usinas termelétricas, de acordo com a equação a seguir:

$$OM_{sh} = \frac{\sum_{j \in s} [P_{jh} \times D_{jh} \times FT_{j(y-1)}] + \sum_{s'} [P_{(s's)h} \times I_{(s's)h} \times \overline{OM}_{s'm}]}{\sum_{j \in s} [P_{jh} \times D_{jh}] + \sum_{s'} [P_{(s's)h} \times I_{(s's)h}]} \quad h \in m \quad (3)$$

$$\overline{OM}_{sm} = \sum_{h \in m} \left\{ \frac{\sum_{j \in s} [P_{jh} \times D_{jh} \times FT_{j(y-1)}]}{\sum_{j \in s} [P_{jh} \times D_{jh}]} \times \sum_{j \in s} D_{jh} \right\} / \sum_{h \in m} \sum_{j \in s} D_{jh} \quad (3a)$$

Os valores de P_{jh} são calculados a partir da ordem de despacho. $P_{jh} = 1$ se a usina está contida nos 10% superiores da energia despachada e $P_{jh} = 0$ se a usina não está contida nos 10% superiores da energia despachada. Para a usina que tem apenas uma fração x nos 10% superiores, $P_{jh} = x$.³

A ordem de despacho para um submercado é: usinas hidrelétricas, eólicas, nucleares, importações de outros sistemas em ordem crescente de custo, usinas termelétricas em ordem crescente de custo de geração.

5) Cálculo do fator de emissão da margem de construção

O fator de emissão da margem de construção (BM) é o fator de emissão médio do conjunto de usinas mais novas do submercado. Esse conjunto deverá conter no mínimo 5 usinas e sua capacidade instalada ser maior que 20% da capacidade instalada do submercado.

$$BM_{sy} = \frac{\sum_{j \in s} [R_{j(y-1)} \times G_{j(y-1)} \times FT_{j(y-1)}]}{\sum_{j \in s} [R_{j(y-1)} \times G_{j(y-1)}]} \quad (4)$$

Os valores de R_{jy} são calculados a partir do histórico de entrada em operação das usinas. $R_{jy} = 1$ se parte ou o total da geração da usina está contida nos 20% da geração total correspondente às usinas mais novas e $R_{jy} = 0$ se a usina não está contida nos 20% da geração total correspondente às usinas mais novas.

6) Cálculo do fator de emissão anual do projeto (margem combinada)

Os valores disponibilizados pelo ONS são utilizados para cálculo do fator de emissão da linha de base associado ao projeto da forma descrita a seguir.

³ A metodologia ACM0002, versão 6, estabelece que se uma usina tem qualquer parcela nos 10% superiores então $P_{jh} = 1$. A opção de adotar a fração real contida nos 10% superiores decorre da dificuldade de aplicar a metodologia no caso dessa usina ser parte do despacho hidrelétrico (considerado como um todo) ou parte do intercâmbio de outros submercados.

O fator de emissão referente à margem de operação é a média ponderada (pela geração do projeto) dos fatores de emissão horários para o submercado em que está inserido o projeto, de acordo com a equação a seguir:

$$FO_y = \frac{\sum_{h \in y} [GP_h \times OM_{\bar{s}h}]}{\sum_{h \in y} GP_h} \quad (5)$$

O fator de emissão da margem combinada é calculado de acordo com a equação a seguir:

$$FC_y = WO_{\bar{i}} \times FO_y + (1 - WO_{\bar{i}}) \times BM_{\bar{s}y} \quad (6)$$

O valor padrão de $WO_{\bar{i}}$ é 0,75 para projetos de energia solar e eólica e 0,5 para outros tipos de projeto. Outros valores entre 0,25 e 0,75 podem ser utilizados se justificados.

Parâmetros e dados utilizados no cálculo dos fatores de emissão no Sistema Interligado Nacional

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por quatro submercados de energia: Norte, Nordeste, Sul e Sudeste/Centro-Oeste. Nas tabelas abaixo estão listadas as usinas termelétricas de cada submercado, com o respectivo tipo de combustível primário utilizado (1). O submercado Norte não possui usinas termelétricas despachadas pelo ONS.

Tabela 1

Submercado	Nome	Combustível atual	Unidade da Federação
Nordeste	FAFEN	Gás Natural	BA
	S.C.JEREISATI	Gás Natural	CE
	TERMOBAHIA	Gás Natural	BA
	US.CAMACARI	Gás Natural	BA
	UT PERNAMBUCO	Gás Natural	PE
	UT. FORTALEZA	Gás Natural	CE
Sul	Nome	Combustível atual	Unidade da Federação
	P.MEDICI	Carvão	RS
	PORTO ALEGRE	Óleo Combustível	RS
	SAO JERONIMO	Carvão	RS
	U. ALEGRETE	Óleo Combustível	RS
	U. CANOAS	Gás Natural	RS
	U.CHARQUEADAS	Carvão	RS
	U.JLACERDA-A	Carvão	SC
	U.JLACERDA-B	Carvão	SC
	U.JLACERDA-C	Carvão	SC
	U.URUGUAIANA	Gás Natural	RS
	US. FIGUEIRA	Carvão	PR
	ARAUCÁRIA	Gás Natural	PR

Submercado Sudeste/Centro- Oeste	Nome	Combustível atual	Unidade da Federação
	ANGRA 1	Nuclear	RJ
	ANGRA 2	Nuclear	RJ
	CAMPOS	Gás Natural	RJ
	CARIOBA	Óleo Combustível	SP
	CUIABA-ENRON	Gás Natural	MT
	IBIRITE	Gás Natural	MG
	IGARAPE	Óleo Combustível	MG
	JUIZ DE FORA	Gás Natural	MG
	MACAE MERCHAN	Gás Natural	RJ
	NO.FLUMINENSE	Gás Natural	RJ
	NOVA PIRATININGA	Gás Natural	SP
	PIRATININGA	Gás Natural	SP
	SANTA CRUZ	Óleo Combustível	RJ
	TER BRASILIA	Óleo Diesel	DF
	TERMORIO	Gás Natural	RJ
	TRES LAGOAS	Gás Natural	MS
B.L.SOBRINHO (ELETROBOLT)	Gás Natural	RJ	
U. W. ARJONA	Gás Natural	MS	

(1) Dados de dezembro/2006

Etapa 1 - Cálculo do fator de emissão de CO₂ por tipo de combustível

O fator de emissão de CO₂ por tipo de combustível (FC_c) é calculado de acordo com a Equação (1). Os valores de conteúdo de energia por unidade de combustível (CE_c), dos fatores de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível (FE_c) e os fatores de oxidação dos combustíveis (OX_c) são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2

Combustíveis	Unidade	Conteúdo de energia por combustível (TJ/unidade)	Fator de emissão de carbono por combustível (t C/TJ)	Fator de oxidação	
Óleo Diesel	1000 m ³	35,52	20,20	0,99	
	10 ⁶ l	35,52	20,20	0,99	
Óleo Combustível	10 ⁶ l	40,15	21,10	0,99	
	1000 t	40,15	21,10	0,99	
Carvão Vapor (sem esp.)	1000 t	11,93	25,80	0,98	
	3100	1000 t	12,35	25,80	0,98
	3300	1000 t	12,98	25,80	0,98
	3700	1000 t	14,65	25,80	0,98
	4200	1000 t	16,75	25,80	0,98
	4500	1000 t	17,79	25,80	0,98
	4700	1000 t	18,63	25,80	0,98
	5200	1000 t	20,52	25,80	0,98
	5900	1000 t	23,45	25,80	0,98
	6000	1000 t	23,86	25,80	0,98
Gás Natural Seco	10 ⁶ m ³	36,84	15,30	0,995	
Gás de Coqueria	10 ⁶ m ³	18	29,50	0,995	

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN/MME e do IPCC

Exemplos: Cálculo do fator de emissão de CO₂ para o óleo combustível

$$40,15 \text{ TJ}/1000\text{t} * 21,10 \text{ tC}/\text{TJ} * 0,99 * 44/12 = 3075,209 \text{ tCO}_2/1000\text{t de óleo combustível}$$

Cálculo do fator de emissão de CO₂ para o carvão

$$11,93 \text{ TJ}/1000\text{t} * 25,80 \text{ tC}/\text{TJ} * 0,98 * 44/12 = 1106,006 \text{ t CO}_2/1000 \text{ t de carvão}$$

Etapa 2 - Cálculo do fator de emissão de CO₂ por usina termelétrica

O fator de emissão de CO₂ por usina termelétrica (FT_{jy}) é calculado de acordo com a Equação (2), utilizando os fatores de emissão de CO₂ por tipo de combustível, calculados na Etapa 1. Os valores de consumo anual de combustíveis (primário e secundários) por usina (CC_{cyj}) são fornecidos pelo MME e os valores de geração anual de energia elétrica por usina (G_{jy}) são consolidados pelo ONS.

A planilha a seguir apresenta um exemplo dos dados utilizados de consumo anual de combustíveis por usina e de valores de geração anual de energia elétrica por usina:

Tabela 3

Nome da Usina		USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4
Submercado		S	SE	S	S
Estado		RS	SP	RS	SC
Combustíveis	Unidade	Consumo	Consumo	Consumo	Consumo
Óleo Diesel	1000 m ³				
	10 ⁶ l		0,023856		0,966231
Óleo Combustível	10 ⁶ l				
	1000 t	18,726		0,527	1,4092
Carvão Vapor (sem esp.)	1000 t	2068,36			
	1000 t			305,698	
	1000 t				
	1000 t				
	1000 t				
	1000 t				589,553
	1000 t				
	1000 t				
	1000 t				
	1000 t				
Gás Natural Seco	10 ⁶ m ³		63,495		
Gás de Coqueria	10 ⁶ m ³				
Geração	MWh	1699615	185974,8	214094,4	879153,6

Para exemplificar, segue o cálculo das emissões da USINA 1 em t CO₂:

- Emissão pelo consumo de diesel: $18,726 * 3075,209 = 57586,36 \text{ t CO}_2$
- Emissão pelo consumo de carvão: $2068,36 * 1106,006 = 2287619,48 \text{ t CO}_2$

A emissão total de CO₂ da USINA 1 será de 2345205,8 t CO₂.

O fator de emissão de cada usina é calculado dividindo-se o total de emissão da usina (em t CO₂) pela geração total verificada (em MWh).

Exemplificando, o fator de emissão da USINA 1 será igual a:

$$2345205,8 / 1699615 = 1,38 \text{ t CO}_2/\text{MWh}$$

Para as demais usinas, o procedimento é realizado da mesma forma e apresentado na tabela a seguir.

Tabela 4

Nome da Usina		USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4
Submercado		S	SE	S	S
Estado		RS	SP	RS	SC
Combustíveis	Unidade	Emissões	Emissões	Emissões	Emissões
Óleo Diesel	t CO ₂	0	0	0	0
	t CO ₂	0	62,133895	0	2516,5868
Óleo Combustível	t CO ₂	0	0	0	0
	t CO ₂	57586,363	0	1620,6351	4333,5845
Carvão Vapor (sem esp.)	t CO ₂	2287619,5	0	0	0
3100	t CO ₂	0	0	350007,03	0
3300	t CO ₂	0	0	0	0
3700	t CO ₂	0	0	0	0
4200	t CO ₂	0	0	0	0
4500	t CO ₂	0	0	0	972335,21
4700	t CO ₂	0	0	0	0
5200	t CO ₂	0	0	0	0
5900	t CO ₂	0	0	0	0
6000	t CO ₂	0	0	0	0
Gás Natural Seco	t CO ₂	0	130570,51	0	0
Gás de Coqueria	t CO ₂	0	0	0	0
Total		2345205,8	130632,64	351627,66	979185,38
FE	t CO ₂ /MWh	1,38	0,70	1,64	1,11

Etapa 3 - Cálculo do fator de emissão da margem de operação, por submercado

O fator de emissão da margem de operação para cada submercado (OM_{sh}) é calculado de acordo com a Equação (3), a partir dos valores de geração horária de cada usina (D_{jh}), dos valores de energia importada dos submercados vizinhos ($I_{ss'h}$) e dos fatores de emissão de CO₂ por usina termelétrica FT_{jy} calculados na Etapa 2.

Para as usinas hidráulicas, eólicas e nucleares, é considerado um fator de emissão $FT = 0$.

Numa primeira fase dessa etapa, são calculados os fatores de emissão de cada submercado, considerando-se apenas a geração das usinas pertencentes ao submercado, de acordo com a Equação (3a). O fator de emissão mensal do submercado será a média ponderada dos fatores de emissão de cada hora do mês para os 10% de geração marginal naquele horário.

Numa segunda fase dessa etapa, o cálculo é repetido, considerando-se, agora, os intercâmbios, com um fator de emissão associado à energia importada igual ao fator de emissão do submercado exportador, calculado na primeira fase.

A ordem de prioridade de despacho é obtida a partir do Programa Mensal de Operação-PMO, elaborado pelo ONS para cada mês, no qual são definidas as usinas térmicas despachadas e os

correspondentes montantes de geração, os intercâmbios entre submercados e as gerações das usinas hidráulicas. São também informados os custos de operação de cada usina térmica e o custo marginal de operação de cada submercado.

O fator de emissão do submercado Norte, desconsiderando os intercâmbios com os outros submercados, ou seja, na primeira fase dessa etapa, é zero, pois o submercado Norte não possui térmicas. Com a consideração dos intercâmbios, na segunda etapa, o fator de emissão do submercado Norte não será mais zero, devido à influência dos fatores de emissão dos submercados vizinhos.

Os cálculos das equações (3) e (3a) foram implementados em planilha, em que os valores de geração das usinas são preenchidos de forma ordenada para que possam ser estabelecidas as frações de geração contidas nos 10% de geração marginal em cada hora (P_{jh}).

Preenche-se cada linha da planilha de cálculo com os valores verificados para cada hora, na seguinte ordem:

- 1) geração hidráulica, eólica e nuclear - colunas brancas;
- 2) importação de outros submercados (somente a partir da segunda fase). Preencher com as importações de submercados vizinhos em ordem crescente de custo marginal dos sistemas exportadores - colunas azuis;
- 3) geração térmica por usina - ordenar as térmicas em ordem crescente de custo - colunas verdes.

A figura a seguir apresenta um exemplo de cálculo do fator de emissão da margem de operação do submercado A, que apresenta uma fronteira com um submercado B. Nesse exemplo, por simplificação, utilizaram-se somente dados de um dia.

Na primeira etapa não é considerada a importação do submercado B.

Na linha 1 da Tabela 5, são informados os custos das térmicas, ordenados do menor ao maior custo.

Na linha 2 da Tabela 5, são informados os fatores de emissão de cada usina, calculados na Etapa 1.

Tabela 5

Custo FE	0	0	90,89	104,5	110,48	116,1	155	160,03	186,72	191,08
Hora	Soma Hidrel.	Soma Eólica	Int. B-A	USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4	USINA 5	USINA 6	USINA 7
1	984,1	7,6	0,0	269,6	91,1	0,0	184,8	99,8	0,0	26,0
2	662,0	13,6	0,0	295,3	91,0	0,0	185,5	100,4	0,0	26,3
3	509,7	15,9	0,0	295,1	91,0	0,0	185,4	100,3	0,0	26,3
4	510,6	13,9	0,0	296,5	90,5	0,0	185,5	100,5	1,3	26,2
5	510,4	13,5	0,0	298,2	90,5	0,0	185,2	100,7	0,0	26,1
6	512,0	14,1	0,0	299,1	90,6	0,0	185,5	100,4	0,0	25,9
7	580,0	13,8	0,0	297,9	90,7	0,0	185,2	100,8	0,0	26,0
8	866,6	6,8	0,0	299,9	90,9	0,0	185,1	100,7	0,0	25,9
9	1085,9	3,5	0,0	299,4	90,7	0,0	185,3	100,6	0,0	26,0
10	1335,7	1,0	0,0	297,8	90,6	0,0	184,9	100,4	0,0	26,2
11	1439,0	0,0	0,0	298,7	90,6	0,0	185,6	100,3	0,0	26,2
12	1360,1	0,0	0,0	301,9	90,5	0,0	184,8	99,9	4,9	26,3
13	1013,1	0,0	0,0	304,1	90,6	0,0	185,3	100,1	5,9	26,3
14	886,9	0,0	0,0	302,8	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3
15	1212,9	0,0	0,0	301,4	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3
16	3152,1	0,0	0,0	299,4	90,7	0,0	184,7	99,5	6,5	26,1
17	2556,9	0,0	0,0	295,9	90,7	0,0	184,7	99,2	6,5	26,0
18	3104,9	0,0	0,0	298,0	90,9	0,0	184,8	99,8	6,5	26,1
19	4483,4	0,1	0,0	301,3	90,9	0,0	184,1	99,7	6,5	25,9
20	2660,8	0,5	0,0	299,5	91,1	0,0	183,9	99,3	6,5	26,0
21	1942,4	0,7	0,0	303,8	91,1	0,0	193,9	99,8	6,6	26,0
22	1544,7	0,0	0,0	304,7	90,8	0,0	183,9	99,8	6,4	26,0
23	940,8	0,1	0,0	303,1	90,8	0,0	183,8	99,3	6,4	26,1
24	599,5	2,0	0,0	303,2	91,0	0,0	183,9	99,4	6,5	26,2

Uma vez preenchidas as colunas de geração verificada (hidráulicas, eólicas, nuclear e térmicas), podem ser determinados os 10% superiores da curva de prioridade de despacho (coluna laranja). Esses 10% serão então atribuídos às usinas por ordem decrescente (Usina 10, Usina 9, etc.) até completar os 10 % de energia (para a primeira hora: 167,1 MWh). O fator de emissão para essa hora é a soma ponderada do produto da geração de cada uma dessas usinas pelo fator de emissão das mesmas. Para a primeira hora será 1,233 tCO₂/MWh ((0x0 + 0x0 + 7,7x2,08 + 26,0x1,64 + 0x1,01 + 99,8x1,11 + 33,6x1,08) t CO₂/167,1 MWh). O fator de emissão horária do submercado A encontra-se na coluna cinza da Tabela 6.

Tabela 6

FE USINA	1,379845181	0,541370383	0,86090156	1,075921049	1,113781919	1,009776341	1,642395433	2,081127034	0	0		
Hora	USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4	USINA 5	USINA 6	USINA 7	USINA 8	USINA 9	USINA 10	10% Geração	FE Hora
1	0,0	0,0	0,0	33,6	99,8	0,0	26,0	7,7	0,0	0,0	167,1	1,233
2	0,0	0,0	0,0	3,7	100,4	0,0	26,3	7,8	0,0	0,0	138,2	1,268
3	0,0	0,0	0,0	0,0	89,2	0,0	26,3	7,6	0,0	0,0	123,1	1,286
4	0,0	0,0	0,0	0,0	88,2	1,3	26,2	7,5	0,0	0,0	123,2	1,284
5	0,0	0,0	0,0	0,0	89,6	0,0	26,1	7,5	0,0	0,0	123,2	1,285
6	0,0	0,0	0,0	0,0	90,6	0,0	25,9	7,0	0,0	0,0	123,4	1,279
7	0,0	0,0	0,0	0,0	97,2	0,0	26,0	7,0	0,0	0,0	130,1	1,271
8	0,0	0,0	0,0	24,7	100,7	0,0	25,9	7,0	0,0	0,0	158,3	1,237
9	0,0	0,0	0,0	46,0	100,6	0,0	26,0	7,2	0,0	0,0	179,9	1,219
10	0,0	0,0	0,0	70,5	100,4	0,0	26,2	7,3	0,0	0,0	204,4	1,203
11	0,0	0,0	0,0	81,1	100,3	0,0	26,2	7,1	0,0	0,0	214,7	1,196
12	0,0	0,0	0,0	68,9	99,9	0,0	26,3	7,5	0,0	0,0	207,6	1,201
13	0,0	0,0	0,0	33,9	100,1	5,9	26,3	7,1	0,0	0,0	173,3	1,223
14	0,0	0,0	0,0	20,8	99,8	6,3	26,3	7,3	0,0	0,0	160,5	1,235
15	0,0	0,0	0,0	53,2	99,8	6,3	26,3	7,4	0,0	0,0	193,9	1,209
16	0,0	62,7	0,0	184,7	99,5	6,5	26,1	7,1	0,0	0,0	386,6	1,055
17	0,0	3,5	0,0	184,7	99,2	6,5	26,0	6,8	0,0	0,0	326,7	1,147
18	0,0	57,6	0,0	184,8	99,8	6,5	26,1	7,1	0,0	0,0	381,8	1,061
19	106,6	90,9	0,0	184,1	99,7	6,5	25,9	6,1	0,0	0,0	519,8	1,091
20	0,0	15,5	0,0	183,9	99,3	6,5	26,0	6,2	0,0	0,0	337,4	1,123
21	0,0	0,0	0,0	127,3	99,8	6,6	26,0	6,4	0,0	0,0	266,1	1,168
22	0,0	0,0	0,0	87,6	99,8	6,4	26,0	6,4	0,0	0,0	226,3	1,184
23	0,0	0,0	0,0	26,7	99,3	6,4	26,1	7,3	0,0	0,0	165,8	1,229
24	0,0	0,0	0,0	0,0	92,2	6,5	26,2	7,0	0,0	0,0	131,9	1,265

Nesse exemplo, o fator de emissão médio da margem de operação do submercado A é 1,176, que é a média ponderada calculada a partir de cada hora. O fator de ponderação aplicado é a geração total para cada hora.

Na segunda fase, considera-se a importação de submercados vizinhos, com o fator de emissão associado à importação igual ao fator de emissão médio do submercado exportador calculado na primeira fase.

Tabela 7

Custo			90,89	104,5	110,48	116,1	155	160,03	186,72	191,08	248,31	572
FE Usina	0	0	0,157	1,379845181	0,541370383	0,86090156	1,075921049	1,113781919	1,009776341	1,642395433	2,081127034	0
Hora	Soma Hidrel.	Soma Eólica	Int. B-A	USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4	USINA 5	USINA 6	USINA 7	USINA 8	USINA 9
1	984,1	7,6	4886,0	269,6	91,1	0,0	184,8	99,8	0,0	26,0	7,7	0,0
2	662,0	13,6	4782,4	295,3	91,0	0,0	185,5	100,4	0,0	26,3	7,8	0,0
3	509,7	15,9	4712,9	295,1	91,0	0,0	185,4	100,3	0,0	26,3	7,6	0,0
4	510,6	13,9	4604,2	296,5	90,5	0,0	185,5	100,5	1,3	26,2	7,5	0,0
5	510,4	13,5	4579,7	298,2	90,5	0,0	185,2	100,7	0,0	26,1	7,5	0,0
6	512,0	14,1	4683,2	299,1	90,6	0,0	185,5	100,4	0,0	25,9	7,0	0,0
7	580,0	13,8	4921,9	297,9	90,7	0,0	185,2	100,8	0,0	26,0	7,0	0,0
8	866,6	6,8	4994,1	299,9	90,9	0,0	185,1	100,7	0,0	25,9	7,0	0,0
9	1085,9	3,5	5250,1	299,4	90,7	0,0	185,3	100,6	0,0	26,0	7,2	0,0
10	1335,7	1,0	5408,0	297,8	90,6	0,0	184,9	100,4	0,0	26,2	7,3	0,0
11	1439,0	0,0	5410,3	298,7	90,6	0,0	185,6	100,3	0,0	26,2	7,1	0,0
12	1360,1	0,0	5443,1	301,9	90,5	0,0	184,8	99,9	4,9	26,3	7,5	0,0
13	1013,1	0,0	5222,7	304,1	90,6	0,0	185,3	100,1	5,9	26,3	7,1	0,0
14	886,9	0,0	5247,3	302,8	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3	7,3	0,0
15	1212,9	0,0	4778,1	301,4	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3	7,4	0,0
16	3152,1	0,0	2828,6	299,4	90,7	0,0	184,7	99,5	6,5	26,1	7,1	0,0
17	2556,9	0,0	2450,5	295,9	90,7	0,0	184,7	99,2	6,5	26,0	6,8	0,0
18	3104,9	0,0	2474,5	298,0	90,9	0,0	184,8	99,8	6,5	26,1	7,1	0,0
19	4483,4	0,1	3777,1	301,3	90,9	0,0	184,1	99,7	6,5	25,9	6,1	0,0
20	2660,8	0,5	5078,1	299,5	91,1	0,0	183,9	99,3	6,5	26,0	6,2	0,0
21	1942,4	0,7	5334,7	303,8	91,1	0,0	183,9	99,8	6,6	26,0	6,4	0,0
22	1544,7	0,0	5248,6	304,7	90,8	0,0	183,9	99,8	6,4	26,0	6,4	0,0
23	940,8	0,1	5210,1	303,1	90,8	0,0	183,8	99,3	6,4	26,1	7,3	0,0
24	599,5	2,0	4914,5	303,2	91,0	0,0	183,9	99,4	6,5	26,2	7,0	0,0

Com a introdução desses novos dados, o resultado final passa a ser:

Tabela 8

Hora	USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4	USINA 5	USINA 6	USINA 7	USINA 8	USINA 9	USINA 10	10% Ger.	FE Hora
1	246,3	91,1	0,0	184,8	99,8	0,0	26,0	7,7	0,0	0,0	655,7	1,156
2	205,5	91,0	0,0	185,5	100,4	0,0	26,3	7,8	0,0	0,0	616,4	1,141
3	183,8	91,0	0,0	185,4	100,3	0,0	26,3	7,6	0,0	0,0	594,4	1,132
4	172,3	90,5	0,0	185,5	100,5	1,3	26,2	7,5	0,0	0,0	583,7	1,127
5	171,2	90,5	0,0	185,2	100,7	0,0	26,1	7,5	0,0	0,0	581,2	1,127
6	182,5	90,6	0,0	185,5	100,4	0,0	25,9	7,0	0,0	0,0	591,8	1,131
7	212,7	90,7	0,0	185,2	100,8	0,0	26,0	7,0	0,0	0,0	622,3	1,143
8	248,1	90,9	0,0	185,1	100,7	0,0	25,9	7,0	0,0	0,0	657,7	1,156
9	295,0	90,7	0,0	185,3	100,6	0,0	26,0	7,2	0,0	0,0	704,9	1,171
10	297,8	90,6	0,0	184,9	100,4	0,0	26,2	7,3	0,0	0,0	745,2	1,120
11	298,7	90,6	0,0	185,6	100,3	0,0	26,2	7,1	0,0	0,0	755,8	1,108
12	301,9	90,5	0,0	184,8	99,9	4,9	26,3	7,5	0,0	0,0	751,9	1,124
13	280,3	90,6	0,0	185,3	100,1	5,9	26,3	7,1	0,0	0,0	695,5	1,165
14	269,5	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3	7,3	0,0	0,0	685,3	1,162
15	254,9	90,9	0,0	185,2	99,8	6,3	26,3	7,4	0,0	0,0	670,8	1,157
16	254,9	90,7	0,0	184,7	99,5	6,5	26,1	7,1	0,0	0,0	669,5	1,157
17	157,8	90,7	0,0	184,7	99,2	6,5	26,0	6,8	0,0	0,0	571,7	1,119
18	214,2	90,9	0,0	184,8	99,8	6,5	26,1	7,1	0,0	0,0	629,2	1,142
19	301,3	90,9	0,0	184,1	99,7	6,5	25,9	6,1	0,0	0,0	897,5	0,963
20	299,5	91,1	0,0	183,9	99,3	6,5	26,0	6,2	0,0	0,0	845,2	1,010
21	303,8	91,1	0,0	183,9	99,8	6,6	26,0	6,4	0,0	0,0	799,5	1,067
22	304,7	90,8	0,0	183,9	99,8	6,4	26,0	6,4	0,0	0,0	751,1	1,127
23	273,0	90,8	0,0	183,8	99,3	6,4	26,1	7,3	0,0	0,0	686,8	1,163
24	209,4	91,0	0,0	183,9	99,4	6,5	26,2	7,0	0,0	0,0	623,3	1,140
											1,121	

Etapa 4 - Cálculo do fator de emissão da margem de construção

O fator de emissão da margem de construção para cada submercado (BM_{sy}) é calculado de acordo com a Equação (4), a partir dos valores de geração anual de cada usina no ano anterior ($G_{j(y-1)}$) e dos fatores de emissão de CO₂ por usina termelétrica $FT_{j(y-1)}$ calculados na Etapa 2.

Para cada submercado, as usinas são ordenadas em ordem crescente de data de entrada em operação, sendo selecionadas aquelas mais novas responsáveis por mais de 20% da geração anual do submercado. Para a última selecionada, que completa os 20% da geração total, é considerada a geração total da usina. O fator de emissão da margem de construção é calculado pela média dos fatores de emissão das usinas selecionadas, utilizando como fator de ponderação a geração anual dessas usinas.

A figura a seguir apresenta o cálculo do fator de emissão da margem de construção para um submercado A que teve uma geração total de 12.000.000 MWh no ano. A parcela de 20% desse total é igual a 2.400.000 MWh.

As usinas são ordenadas em ordem crescente de data de entrada em operação, levando em consideração o início de testes de comissionamento da primeira unidade da usina. No exemplo, oito usinas foram suficientes para complementar os 20% do total da geração do submercado A.

Tabela 9

	USINA 1	USINA 2	USINA 3	USINA 4	USINA 5	USINA 6	USINA 7	USINA 8	
$G_{j(y-1)}$	540.000,00	65.000,00	26.300,00	440.500,00	248.000,00	361.200,00	409.000,00	520.000,00	
$FT_{j(y-1)}$	0	0	0	0,705	0	0,458	0,657	0	
$R_{j(y-1)}$	1	1	1	1	1	1	1	1	
Soma($R \cdot FT \cdot G$)	-	-	-	310.552,50	-	165.429,60	268.713,00	-	744.695,10
Soma($R \cdot G$)	540.000,00	65.000,00	26.300,00	440.500,00	248.000,00	361.200,00	409.000,00	520.000,00	2.610.000,00
									BM (A) = 0,285323793

Pode-se observar que, com a usina 8, são completados os 20% do total de geração e ela contribui com sua geração total. Os valores de FT_{jy} são aqueles calculados na Etapa 2 deste documento.

Efetuada os cálculos chega-se a um fator de emissão de margem de construção para esse submercado A igual a: $BM_A = 0,2853$.

Glossário

- ✓ Submercado de Energia: Subdivisões do sistema interligado, correspondentes a áreas de mercado para as quais a CCEE estabelece preços diferenciados e cujas fronteiras são definidas em função da presença e duração de restrições relevantes de transmissão.
- ✓ Sistema interligado Nacional (SIN): Instalações responsáveis pelo suprimento de energia elétrica a todas as regiões do país, interligadas eletricamente.
- ✓ CCEE: Câmara de Comercialização de Energia.
- ✓ Instalação: Conjunto de partes, elétricas ou não elétricas, necessárias ao funcionamento de um sistema elétrico ou de algum de seus elementos. Usinas, subestações e linhas de transmissão são exemplos de instalação.
- ✓ Sistema Elétrico: Conjunto de instalações para geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica.
- ✓ Geração: Conversão de uma forma qualquer de energia em energia elétrica.
- ✓ Transmissão: Transporte de energia elétrica entre subestações.
- ✓ Distribuição: Transferência de energia elétrica para os consumidores dos pontos onde se considera terminada a transmissão até os pontos de medição, inclusive.
- ✓ Energia: Propriedade de um sistema que lhe permite realizar trabalho. Em eletricidade, mede-se em Watt-hora (Wh) ou seus múltiplos, KWh, MWh, GWh, TWh.
- ✓ Usina hidrelétrica: Usina elétrica na qual a energia elétrica é obtida por conversão da energia gravitacional da água.
- ✓ Usina termelétrica: Usina elétrica na qual a energia elétrica é obtida por conversão de energia térmica.
- ✓ Usina Eólica: Usina elétrica na qual a energia elétrica é obtida por conversão de energia eólica (ventos).