

Modelagem de Fonte de Potência Controlada no ATP/ATPDraw: Um Desenvolvimento Alternativo para Estudos de Fluxo de Potência

Felipe Lopes *, Raphael Reis **, Eubis Machado ***, Flavio Costa ****, Benemar Alencar †, Paulo Camara ‡

* Universidade Federal da Paraíba, PB,
(e-mail: felipelopes@cear.ufpb.br).

** Universidade Federal Rural de Pernambuco, PE
(e-mail: raphael.reis@ufrpe.br)

*** Universidade Federal do Vale do São Francisco, PE
(e-mail: eubis.machado@univasf.edu.br)

**** Michigan Technological University, Michigan-EUA
(e-mail: fbcosta@mtu.edu)

† Universidade Federal de Campina Grande, PB
(e-mail: benemar@dee.ufcg.edu.br)

‡ Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, PE
(e-mail: pcesar@chesf.gov.br)

Abstract: This paper presents a tutorial on the implementation of a simplified controllable source in the Alternative Transients Program (ATP) environment, which is capable of representing electrical energy resources and loads with settable active and reactive power. The model is developed in the ATPDraw platform, taking advantage of the MODELS programming language and Transient Analysis of Control Systems (TACS) elements. To address the proposed source potentialities, examples are presented, including a comparison with a detailed photovoltaic ATP/ATPDraw benchmark power plant model. The results demonstrate that the proposed source is accurate and reliable for stable voltage conditions, allowing the ATP/ATPDraw to be easily used as an alternative platform for power flow studies, facilitating the representation of loads and inverter-based resources in steady-state conditions.

Resumo: Apresenta-se neste artigo um tutorial sobre a implementação de uma fonte controlável simplificada no ambiente *Alternative Transients Program* (ATP), a qual é capaz de representar fontes de energia elétrica e cargas com potência ativa e reativa configuráveis. O modelo é desenvolvido na plataforma ATPDraw, tomando proveito da linguagem de programação MODELS e de elementos *Transient Analysis of Control Systems* (TACS). Para abordar as potencialidades da fonte proposta, exemplos são apresentados, incluindo uma comparação com um modelo detalhado de usina fotovoltaica de referência no ATP/ATPDraw. A partir dos resultados, demonstra-se que a fonte proposta é precisa e confiável para condições de tensão estável, permitindo que o ATP/ATPDraw seja facilmente utilizado como ferramenta alternativa para estudos de fluxo de potência, facilitando a representação de cargas e fontes baseadas em inversores em condições de regime permanente.

Keywords: ATP; ATPDraw; controlled sources; electrical systems; MODELS; TACS.

Palavras-chaves: ATP; ATPDraw; fontes controladas; sistemas elétricos; MODELS; TACS.

1. INTRODUÇÃO

Estudos pré-operacionais de um sistema de energia elétrica (SEE) se fazem necessários em diversas situações práticas. Neste contexto, o uso de ferramentas computacionais para simulação de SEEs se faz crucial, visto que permite a avaliação de diferentes cenários operativos sem que haja a necessidade de intervenção do sistema interligado real (Kim and Harley, 2016).

No Brasil, dentre as plataformas computacionais mais empregadas em estudos elétricos, destacam-se o ANAREDE, ANATEM, ANAFAS e *Alternative Transients Program* (ATP), que se voltam, respectivamente, para estudos de fluxo de carga, transitórios eletromecânicos, estudos de curto-circuito e transitórios eletromagnéticos. Os programas ANAREDE, ANATEM e ANAFAS foram desenvolvidas pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e possuem custo para aquisição de suas licenças. Por outro lado, o ATP possui licença gratuita, contando apenas com o suporte das comunidades de usuários.

* Esta pesquisa é patrocinada pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) no âmbito do projeto PD-0048-0317/2020.

Ainda em relação ao ATP, reconhece-se que a gratuidade de sua licença tem sido decisiva para a ampla utilização da plataforma no contexto dos programas do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP). De fato, existe nesta categoria uma diversidade de outros programas, com licenças não gratuitas e que disponibilizam maior variedade de modelos e suporte para usuários, a exemplo do PSCAD e PS Simul (sendo este último um programa EMTP genuinamente brasileiro). Entretanto, o custo de aquisição das licenças, assim como para o ANAREDE, ANATEM e ANAFAS, ainda é um fator limitante para alguns estudantes e profissionais da engenharia elétrica.

Considerando o contexto supracitado, o ATP tem sido empregado em estudos não necessariamente voltados para a análise de transitórios eletromagnéticos (Gérin-Lajoie and Mahseredjian, 2009; Tamashiro et al., 2014). Nesse sentido, considera-se que o uso do ATP em estudos de fluxo de carga merece destaque, tomando proveito dos modelos precisos prontamente disponíveis, que permitem modelagens detalhadas, com resposta de fluxo de carga compatível com o esperado. Desse modo, a divulgação de modelos ATP/ATPDraw que possam ser de interesse para a comunidade científica nos estudos passíveis de realização na referida plataforma tem sido de grande utilidade para usuários, fato este motivador do presente trabalho.

Neste artigo, apresenta-se a modelagem de uma fonte controlada simplificada no ambiente ATPDraw (interface gráfica do ATP), visando a sua utilização em estudos de fluxo de potência. A fonte é capaz de representar elementos elétricos com potência ajustável em condições de tensão estável, tais como cargas com potência constante e fontes de geração que operam com característica de fonte de corrente, a exemplo de fontes eólicas do tipo *Full Converter* e de plantas fotovoltaicas, com operação segundo tecnologia *grid-following*. Inicialmente, apresentam-se os fundamentos matemáticos do modelo e, na sequência, descreve-se a sua implementação, fazendo-se uso da linguagem MODELS do ATP, de elementos TACS e de blocos funcionais já disponíveis nas versões mais recentes do ATPDraw. Por fim, apresentam-se análises demonstrativas, a partir das quais destacam-se as potencialidades do modelo para estudos de fluxo de carga no ATP/ATPDraw. Dos resultados, prova-se que o modelo desenvolvido é capaz de representar de forma fidedigna a injeção ou absorção de potência ativa ou reativa em sistemas modelados no ATP, viabilizando estudos precisos de fluxo de carga, com a vantagem da utilização de uma plataforma computacional isenta de custos para aquisição de licença.

2. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

Durante a execução de estudos elétricos, é comum o debate sobre a melhor forma de representar cargas e fontes. Dentre os possíveis modelos existentes, destacam-se as representações por meio de impedância, corrente e potência constantes, ou por meio do modelo ZIP, o qual consiste na combinação das opções anteriores (Jereminov et al., 2019; Hatipoglu et al., 2012; Dong et al., 2008; Höger et al., 2019). No contexto do fluxo de carga, é comum a especificação destas em termos de potência, recaindo na necessidade de controle de potências injetadas ou consumidas nos nós elétricos do circuito sob análise.

Matematicamente, os modelos mencionados são amplamente conhecidos, sendo frequentemente reportados na literatura e disponibilizados em alguns programas voltados exclusivamente para estudos de fluxo de carga (Pequeno, 2010). Porém, ao considerar o ATP/ATPDraw como ferramenta computacional alternativa, é comum o enfrentamento de dificuldades por parte dos usuários na modelagem dos casos. Isso ocorre especialmente quando do ajuste de elementos RLC para representação de cargas com potências específicas, ou de fontes para simulação de plantas geradoras baseadas em inversores, que possuem modelagens diferentes das máquinas síncronas, operando como fonte de corrente (Jones et al., 2018). Assim, ao utilizar o ATP/ATPDraw em estudos de fluxo de carga, é crucial a definição de relações matemáticas que permitam o controle de potência ativa P e reativa Q , simulando apropriadamente o fator de potência FP de interesse.

Para realizar o desenvolvimento sugerido, neste trabalho, toma-se como referência a tensão v estabelecida pelo SEE no ponto de conexão da fonte/carga. A partir disso, correntes i são sintetizadas com módulo e ângulo compatíveis ao FP de interesse, na frequência ω fundamental de v , que pode ser estimada a partir de *Phase Locked Loops* (PLLs) (Stensby, 1997). Diante do exposto, dois modelos são apresentados neste artigo, sendo o primeiro baseado em um PLL ideal, em que a frequência de síntese das correntes é tratada como um ajuste do arranjo, sem contemplar eventuais variações na frequência da rede, e o segundo baseado em uma síntese de correntes por meio da estimação via PLL da frequência da tensão estabelecida pelo SEE.

Assumindo que a tensão de referência v foi medida adequadamente e que a estimação da frequência angular ω no lado da rede elétrica foi realizada com sucesso, o módulo e ângulo das correntes de saída da fonte devem ser estimados, os quais dependem do módulo e ângulo das tensões terminais. Em termos fasoriais, v e i são representadas por:

$$\hat{V} = V \angle \theta_v, \quad (1)$$

$$\hat{I} = I \angle \theta_i, \quad (2)$$

sendo \hat{V} e \hat{I} os fasores de tensão e corrente, respectivamente, V e θ_v o módulo e o ângulo do fasor de tensão, e I e θ_i o módulo e o ângulo do fasor de corrente. Assim, assumindo valores trifásicos pré-determinados das potências P e Q , em uma condição de operação equilibrada, tem-se em um sistema trifásico que:

$$S = 3S_{1\phi} = 3(\hat{V}_\phi \cdot \hat{I}_\phi^*) = P + jQ, \quad (3)$$

em que S é a potência complexa trifásica, $S_{1\phi}$ é a potência complexa por fase dada por $S_{1\phi} = \frac{|S|}{3} \angle \theta$, sendo $|S|$ a potência aparente trifásica, V_ϕ é a tensão da fase ϕ para terra e I_ϕ a corrente na fase ϕ .

Portanto, ainda considerando uma operação equilibrada da rede elétrica, é possível demonstrar que:

$$\frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3} \angle \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) = V_\phi I_\phi \angle \theta_{v,\phi} - \theta_{i,\phi}. \quad (4)$$

Assim, analisando módulo e ângulo em (4), é possível ajustar os valores característicos das correntes de interesse na fase ϕ , procedendo com as seguintes relações:

$$I_\phi = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3V_\phi}, \quad (5)$$

$$\theta_{i,\phi} = \theta_{v,\phi} - \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right). \quad (6)$$

As correntes trifásicas são sintetizadas com frequência angular ω , respeitando ajustes dos ângulos de fase para representar a sequência de fases da rede elétrica. Por exemplo, para um sistema com sequência de fases ABC, tem-se que:

$$i_a(t) = I_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta_{i,\phi}), \quad (7)$$

$$i_b(t) = I_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta_{i,\phi} - 120^\circ), \quad (8)$$

$$i_c(t) = I_\phi \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta_{i,\phi} + 120^\circ). \quad (9)$$

Ressalta-se que o modelo de fonte proposto consiste em uma versão simplificada, que não tem o objetivo de representar dinâmicas de geração baseada em inversores ou de cargas, seja esse comportamento proveniente das características dos inversores ou mesmo de eventos de curto-circuito na rede elétrica. Desse modo, uma vez que o foco está em estudos de fluxo de potência usando o ATP/ATPDraw como ferramenta alternativa, necessita-se apenas de uma condição de tensão estável para que o modelo opere corretamente, o qual se auto-ajusta para manter o consumo ou fornecimento das potências P e Q na simulação. Nesse contexto, deve-se entender que a síntese das correntes dependerá do desempenho dos PLL para estimação de ω e da estimação do módulo V_ϕ das tensões no ponto de acoplamento. Tais funcionalidades podem ser implementadas de diferentes formas, não sendo o objetivo deste trabalho apresentar propostas inovadoras ou realizar análises comparativas de soluções existentes. Em contrapartida, é importante entender que o sistema com PLL é mais realístico, podendo ser usado para representar os impactos de eventuais desvios de frequência na rede elétrica sobre o fluxo de potência de saída de unidades de geração baseadas em inversores.

3. MODELAGEM NO ATP/ATPDRAW

O ATP dispõe de interface gráfica para criação de circuitos, a qual é conhecida como ATPDraw. Esta ferramenta por si só não é capaz de executar simulações, mas é de grande utilidade no momento de criação de blocos funcionais, pois possui vasta biblioteca de modelos prontamente disponíveis para uso. Assim, a fonte com potência ajustável descrita matematicamente na seção 2 é implementada por meio de blocos funcionais do ATPDraw, incluindo módulos de programação via linguagem MODELS e elementos TACS. Nas Figs. 1 e 2, ilustram-se os modelos implementados no ATP/ATPDraw (versão 7.2), com e sem o uso de PLL para estimação de ω , enumerando os blocos funcionais empregados.

Em relação às Figs. 1 e 2, é oportuno mencionar que os blocos de 2 a 8 são similares nos dois modelos, existindo apenas diferenças de programação no bloco 1 (considerando frequência estimada ou como ajuste) e a inclusão dos blocos 9 e 10 quando da estimação de ω via PLL. A opção por essas modelagens se deu pelo interesse em dar flexibilidade à fonte para que operasse na injeção ou absorção de potência. A descrição dos modelos desenvolvidos é apresentada a seguir.

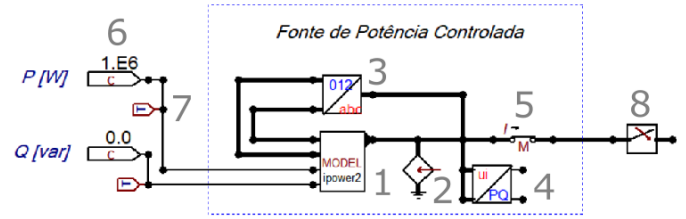


Figura 1. Modelo ATP/ATPDraw com síntese de correntes sem estimação da frequência da rede elétrica.

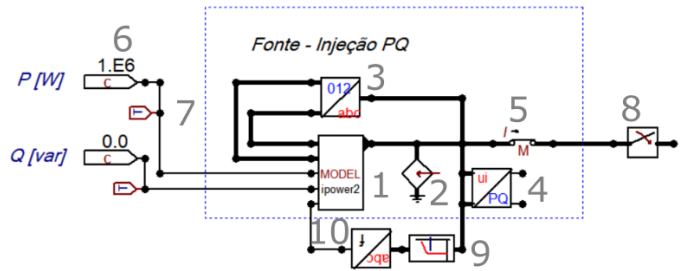


Figura 2. Modelo ATP/ATPDraw com síntese de correntes com estimação da frequência da rede elétrica via PLL.

3.1 Bloco 1: Programação MODELS

As equações (5) e (6) são utilizadas no cálculo de I_ϕ e $\theta_{i,\phi}$. Neste caso, os cálculos se baseiam em funções de soma, multiplicação, divisão, potência de dois e raiz quadrada, que se encontram prontamente disponíveis dentre as funcionalidades da linguagem MODELS nativa do ATP. Portanto, optou-se pela utilização do bloco disponível na aba ¹ MODELS>>Default model, no qual foram programados os códigos demonstrados nas Figs. 3 e 4 para os modelos das Figs. 1 e 2, respectivamente. É importante esclarecer que o bloco Default model se auto ajusta visualmente no ATPDraw em termos de entradas e saídas, requerendo apenas a configuração dos tipos das entradas, conforme será explicado posteriormente.

3.2 Bloco 2: Fonte TACS

As saídas do bloco 1 são tratadas internamente no ATP como variáveis computacionais, não sendo passíveis de interação com o circuito elétrico da simulação. Para converter tais variáveis em correntes elétricas, emprega-se uma fonte TACS, que pode ser encontrada na aba de elementos do ATPDraw Sources>>TACS source. Para sua ativação apropriada, deve-se conectar a saída do bloco 1 ao terminal da fonte TACS (bloco 2), ajustando-a para representar uma fonte de corrente. Em sua forma default, a fonte TACS converte sinais de tensão, de modo que apresenta formato circular. Ao alterar a fonte para o tipo “fonte de corrente”, seu formato passará a ter forma de losango, conforme ilustrado nas Figs. 1 e 2. Deve-se notar ainda que, do mesmo ponto de conexão do bloco 1, deriva-se a conexão para o circuito elétrico, por onde fluirá a corrente de saída da fonte TACS.

¹ Para acessar as abas de elementos do ATPDraw, basta clicar com o botão direito no mouse na área de modelos.

```

MODEL IPOWER2
DATA f (dflt: 60.0)      -- Frequência nominal em Hz
    Seq (dflt: 1.0)      -- Sequência de fases (ABC/CBA)
    VNOM (dflt:220.0)    -- Tensão nominal de linha
INPUT vre[1..3], vim[1..3], P, Q
OUTPUT i[1..3]
VAR Smod, Sang, Imod, Iang, Vmod, Vang, i[1..3] -- Declaração de variáveis
INIT
i[1..3] := 0.0
Smod := 0.0
Sang := 0.0
Imod := 0.0
Iang := 0.0
Vmod := 0.0
Vang := 0.0
ENDINIT
EXEC -- Início da execução do código
Vmod := sqrt(vre[2]*vre[2]+vim[2])/sqrt(2)
Vang := atan2(vim[2], (vre[2]+1E-5))
Smod := sqrt(P^2+Q^2)/3
Sang := atan2(Q, (P+1E-5))
Imod := Smod/(Vmod+1E-5)
Iang := Vang - Sang

if Seq=1.0 then -- Se sequência ABC
i[1]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang)
i[2]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang-120.0*pi/180.0)
i[3]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang+120.0*pi/180.0)
else -- Se sequência CBA
i[1]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang)
i[2]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang+120.0*pi/180.0)
i[3]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang-120.0*pi/180.0)
endif
ENDEXEC -- Fim da execução do código
ENDMODEL

```

Figura 3. Código MODELS empregado no bloco 1 do circuito sem PLL.

```

MODEL IPOWER2
DATA Seq (dflt: 1.0)      -- Sequência de fases (ABC/CBA)
    VNOM (dflt:220.0)    -- Tensão nominal de linha
INPUT vre[1..3], vim[1..3], P, Q, f
OUTPUT i[1..3]
VAR Smod, Sang, Imod, Iang, Vmod, Vang, i[1..3] -- Declaração de variáveis
INIT
i[1..3] := 0.0
Smod := 0.0
Sang := 0.0
Imod := 0.0
Iang := 0.0
Vmod := 0.0
Vang := 0.0
ENDINIT
EXEC -- Início da execução do código
Vmod := sqrt(vre[2]*vre[2]+vim[2])/sqrt(2)
Vang := atan2(vim[2], (vre[2]+1E-5))
Smod := sqrt(P^2+Q^2)/3
Sang := atan2(Q, (P+1E-5))
Imod := Smod/(Vmod+1E-5)
Iang := Vang - Sang

if Seq=1.0 then -- Se sequência ABC
i[1]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang)
i[2]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang-120.0*pi/180.0)
i[3]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang+120.0*pi/180.0)
else -- Se sequência CBA
i[1]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang)
i[2]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang+120.0*pi/180.0)
i[3]:=Imod*sqrt(2)*cos(2*pi*f*t+Iang-120.0*pi/180.0)
endif
ENDEXEC -- Fim da execução do código
ENDMODEL

```

Figura 4. Código MODELS empregado no bloco 1 do circuito com PLL.

3.3 Bloco 3: Componentes Fasoriais de Sequência

A estimação do módulo das tensões no ponto de conexão da fonte se faz necessária para aplicação de (5). Diversas metodologias podem ser empregadas para esse fim, dentre as quais optou-se pela utilização de um bloco MODELS nativo do ATPDraw, que permite o cálculo de componentes de sequência. Assim, a sequência positiva foi tomada como tensão de referência. Este bloco se encontra disponível na aba *Power System Tools>>Phasors>>Sequence 012* e, por ser nativo do ATPDraw, não terá seu código detalhado. É importante mencionar a necessidade de ajuste da frequência fundamental da rede elétrica *FREQ*, da frequência de amostragem *SampleFreq* e das variáveis *Scale* e *Algorithm*. Para sistemas de 50 Hz e 60 Hz, *FREQ*=50 e 60, respectivamente, sugerindo-se *SampleFreq*=400 e 480, respectivamente, o que representa uma taxa de oito amostras por ciclo. Ademais, *Scale*=1 e *Algorithm*=0 pode ser configurado em ambos os casos. Por fim, destaca-se que a entrada do bloco deve ser conectada ao nó de conexão da fonte com o sistema que será simulado.

3.4 Bloco 4: Medição de Potência Ativa e Reativa

Uma vez que está sendo apresentado um elemento de potência controlada, faz-se importante a monitoração da potência de saída da fonte proposta. Para tanto, utiliza-se um bloco MODELS nativo do ATPDraw, o qual está disponível na aba *Power System Tools>>PQ>>PQ 3-phase*. Uma vez que é nativo do ATPDraw, seu código não é detalhado neste trabalho. Ainda assim, é importante explicar que este bloco é opcional e requer ajustes de frequência nominal *FREQ*, taxa de amostragem *SampleFreq*, bem como *ScaleV*, *ScaleI* e *Algorithm*. *FREQ* e *SampleFreq* podem ser ajustados conforme explicado na subseção 3.3, sugerindo-se *ScaleV*=1, *ScaleI*=1 e *Algorithm*=0.

Ainda sobre o bloco 4, se aplicado, suas entradas podem ser interligadas, conforme ilustrado nas Figs. 1 e 2. Entretanto, assim como para os demais blocos MODELS, é imprescindível a configuração dos tipos de entradas, procedimento este que será explicado posteriormente na subseção 3.11.

3.5 Bloco 5: Chave de Medição

O bloco 5 consiste em uma chave de medição disponível na aba *Switches>>Measuring*. Esta chave é empregada para permitir que o ATP reconheça o ponto de medição de corrente usado no bloco 4. Portanto, também consiste em um bloco opcional, caso se deseje monitorar a potência de saída do modelo. Deve-se notar, das Figs. 1 e 2, que se adotou como referência positiva o sentido saindo da fonte. Assim, via bloco 4, torna-se possível calcular as potências *P* e *Q* com polaridades positiva e negativa quando estiverem sendo fornecidas e absorvidas, respectivamente. Para visualizar tal referência de medição, deve-se ativar a opção de medição de *output* do tipo corrente na chave.

3.6 Bloco 6: Constantes TACS

O bloco 1 tem como ajustes os valores de referência das potências trifásicas *P* e *Q*. Esses dados poderiam estar inseridos internamente no bloco, mas visando destacar visualmente o ajuste, optou-se pela utilização de constantes TACS, que podem ser acessadas na aba *TACS>>Sources>>Constant*. Nesses elementos, ajustam-se os valores de referência de *P* e *Q*, que são informadas ao bloco 1 via conexão ilustrada nas Figs. 1 e 2.

3.7 Bloco 7: Probe TACS

Estes elementos também são opcionais, sendo aqui aplicados apenas para visualização no módulo *PLOTXY* do ATP dos valores de referência de *P* e *Q*. Dado que o bloco 6 é um elemento TACS, usa-se o *Probe TACS*, disponível em *Probes & 3-phase>>Probe TACS*.

3.8 Bloco 8: Disjuntor trifásico

Na saída da fonte, sugere-se o uso de um disjuntor trifásico, representado pelo bloco 8. Este elemento também é opcional, sendo sugerido apenas para facilitar eventuais desconexões da fonte controlada dos sistemas elétricos em simulação. Assim, evita-se a necessidade de um reposicionamento manual do circuito no ATPDraw quando for necessária a desconexão da fonte. Esse disjuntor pode ser encontrado na aba *Switches>>Switch time 3-ph*.

3.9 Bloco 9: Filtro Passa-Baixa Butterworth

O bloco 9 é usado apenas no modelo da Fig. 2. Trata-se de um filtro passa-baixa empregado nas tensões que serão utilizadas pelo PLL representado pelo bloco 10. Essa filtragem tem como objetivo eliminar distorções nos sinais de tensão que possam eventualmente causar instabilidades no PLL, que por sua vez causaria instabilidades nas correntes sintetizadas de saída. Em termos de ajustes, esse bloco requer configuração dos parâmetros **Gain** (ganho do filtro), **FilterFreq** (frequência de corte), **FilterOrder** (ordem do filtro) e **ScaleFreq** (frequência de correção do filtro). Neste caso, sugere-se manter ganho unitário, com frequência de corte próxima à segunda ou terceira harmônica do sistema (interesse apenas na fundamental), configurando filtro de ordem 3 e frequência de correção próxima à frequência de corte. Obviamente, deve-se entender que essas são apenas sugestões de ajuste, podendo ser adaptadas a partir das necessidades de cada estudo. Tal filtro se encontra disponível na aba **Power System Tools>>Filters>>Low pass**.

3.10 Bloco 10: PLL

Apenas no sistema da Fig. 2 se faz uso de PLL para estimação da frequência ω usada na síntese das correntes de saída. Para tanto, apesar da grande diversidade de tecnologias de PLL, usa-se neste trabalho um bloco existente no ATPDraw, disponível em **Power System Tools>>PLL**, cujo código, por ser nativo da plataforma, não será detalhado. Esse bloco recebe as tensões filtradas provenientes do bloco 9, tendo como saída a frequência f estimada em hertz, que é usada na síntese das correntes, conforme ilustrado nos códigos apresentados nas Figs. 3 e 4.

3.11 Ajuste dos Tipos de Entradas dos Blocos MODELS e da Ordem de Aplicação

Um requisito mandatório para implementação do modelo proposto consiste na configuração dos tipos de entradas dos blocos MODELS. Ao dar dois cliques em cada terminação dos blocos MODELS, é dada a opção de configuração dos tipos de entrada, que devem ser ajustadas de maneira compatível com o sinal de origem no terminal em questão. Assim, no bloco 1, as entradas provenientes dos blocos 6 devem ser configuradas como do tipo TACS e as entradas provenientes dos blocos 3 e 10 como do tipo MODELS. Nos blocos 3 e 9, as entradas são do tipo tensão e no bloco 4 uma das entradas deve ser configurada como sendo de tensão e a outra como do tipo corrente.

Outro aspecto importante diz respeito à ordem de aplicação dos blocos, especialmente quando uma sequência de processamento de entradas e saídas se faz necessária. O ATP pode gerar os códigos em ordem diferente da requerida na aplicação em análise, sendo então importante a indicação da sequência de execução. Nos blocos MODELS considerados na modelagem da fonte controlada proposta, todos os blocos foram ajustados com ordem '0', exceto o bloco 1 que foi ajustado com ordem '1', pois depende dos demais para aplicar as fórmulas de interesse. É importante frisar que, a depender da sequência de implementação e/ou inserção dos blocos, essa ordem pode ser automaticamente compatível com o formato esperado. Entretanto, o alerta se faz necessário, especialmente quando da inclusão dos

blocos fora da sequência de execução do fluxo de operações a serem executadas. Esse ajuste deve ser realizado no campo **Order** disponível na janela de dados dos blocos funcionais, que pode ser acessada dando-se dois cliques sobre o elemento.

3.12 Fluxograma do modelo e resumo dos ajustes empregados

Visando facilitar a reprodução dos modelos desenvolvidos, apresenta-se na Fig. 5 um fluxograma generalizado dos blocos funcionais empregados, classificando-os como obrigatórios ou opcionais, de acordo com as considerações apresentadas ao longo desta seção. Ademais, em cada bloco, apresenta-se a numeração considerada nas subseções anteriores e um resumo dos ajustes utilizados nos blocos funcionais, respeitando os critérios técnicos apresentados. Neste contexto, destaca-se que o fluxograma é apresentado meramente para facilitar a reprodução do modelo descrito nesta seção, podendo este ser adaptado para outros sistemas de interesse.

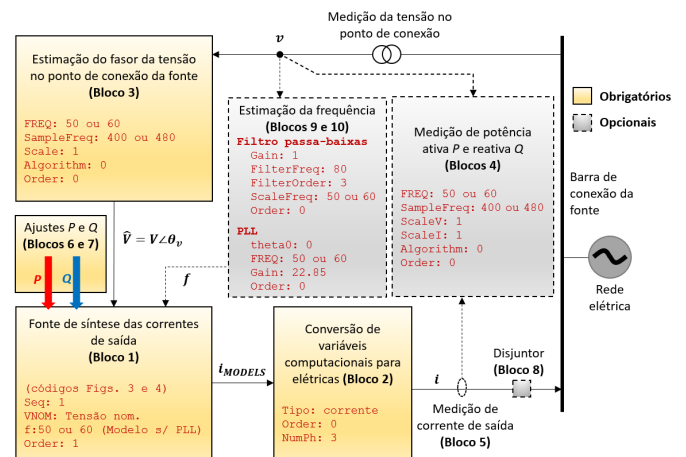


Figura 5. Fluxograma do modelo e resumo de ajustes.

4. DEMONSTRAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Sistemas Teste para Demonstrações

Para viabilizar as demonstrações de estudos de fluxo de carga usando o modelo de fonte desenvolvido, dois sistemas são considerados. O primeiro deles é aqui chamado de Sistema Simplificado (SS) e o segundo é chamado de sistema PV, pois se refere a um modelo de planta fotovoltaica.

O sistema SS é ilustrado na Fig. 6 e consiste em um SEE de 230 kV/60 Hz, que contém uma barra infinita com tensão igual a $1\angle 27.2^\circ$ pu e que se conecta a uma linha de transmissão, cujos parâmetros elétricos são expostos na Tabela 1. Ao final dessa linha de transmissão, encontra-se

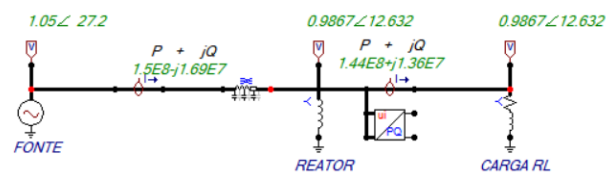


Figura 6. Sistema teste SS.

Tabela 1. Parâmetros da linha do sistema SS.

Comprimento [km]	325, 73	[Ω/km]	B - Susceptância [μS/km]
Sequência Positiva	R - Resistência	0,042406	5,41453
	X - Reatância	0,302799	
Sequência Zero	R - Resistência	0,427905	2,3493
	X - Reatância	1,63734	

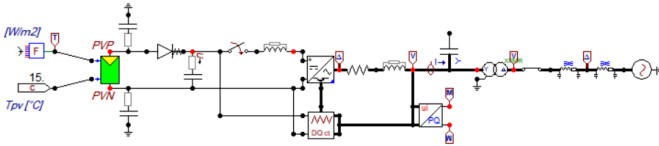


Figura 7. Sistema teste PV.

instalado um reator de 30 Mvar e uma carga que absorve $P = 144,5$ MW e $Q = 13,6$ Mvar, modelada originalmente no ATP/ATPDraw a partir de um elemento de impedância constante RLC, considerando a tensão na barra de conexão igual a 0,987 pu. O modelo foi implementado e ajustado no ATP/ATPDraw, resultando nos fluxos de potência também ilustrados na Fig. 6. Já no modelo do sistema PV, representa-se uma planta fotovoltaica que opera em 50 Hz em rede coletora de 1 kV injetando 1 MW e 0 var em uma rede elétrica de 22 kV, conforme apresentado na Fig. 7. Esse modelo de rede elétrica se encontra disponível no caso exemplo nº 25 das versões mais recentes do ATPDraw, podendo ser também obtido no *website* www.atpdraw.net. Ressalta-se que no modelo PV é contemplada a representação de inversores e de suas lógicas de controle, as quais supervisionam a tensão no barramento CC e a potência entregue à rede elétrica. Por limitações de espaço, mais detalhes sobre o sistema não serão apresentados, os quais podem ser encontrados no *website* www.atpdraw.net.

4.2 Utilização da Fonte Controlada Proposta para Representação de Cargas

A primeira análise consiste na demonstração da operação dos modelos com e sem PLL no estudo de fluxo de carga do sistema SS. Para tanto, realizam-se simulações com tempo máximo de 0,8 s, passo de integração do ATP igual a 1 μs, comparando as medições de potência no ponto de conexão da carga pelo bloco do tipo ui->PQ, tal como ilustrado na Fig. 6. Assim, procede-se com a comparação dos resultados no sistema original e de sistemas adaptados, nos quais a carga foi substituída pela fonte controlada proposta, ajustando-a com $P = -144,5$ MW e $Q = -13,6$ Mvar para simular uma absorção de potência. Os resultados comparativos das potências P e Q são apresentados nas Figs. 8 e 9, respectivamente, onde PORIG, PSPLL e PCPLL representam as potências P para o caso original, caso com fonte proposta sem PLL e caso com fonte proposta com PLL, respectivamente. Da mesma forma, QORIG, QSPLL e QCPLL se referem às potências Q para o caso original, caso com fonte proposta sem PLL e caso com fonte proposta com PLL, respectivamente.

Do exposto nas Figs. 8 e 9, nota-se que os resultados se assemelham, demonstrando a boa precisão do modelo para a análise do fluxo de carga no sistema. Apesar de existir um período de inicialização da fonte proposta em virtude da estimação fasorial realizada por alguns dos blocos

funcionais para estimar as tensões no ponto de conexão, ambas as potências P e Q convergem para os valores do circuito original. Tal fato comprova a possibilidade de utilizar o modelo proposto com ajuste das potências absorvidas, evitando a necessidade de parametrização de elementos RLC.

Uma segunda análise é realizada substituindo também o reator do circuito da Fig. 6 pelo modelo de fonte desenvolvido. A comparação das potências P e Q é realizada considerando medidas de potência no mesmo local do caso anterior. Os resultados obtidos para P e Q são apresentados nas Figs. 10 e 11, respectivamente.

Analisando os resultados, nota-se novamente que o modelo se comportou conforme esperado, fazendo as potências no circuito convergirem para os valores originais após um período de inicialização. Com isso, uma vez desenvolvido o modelo de fonte controlada, torna-se simples a inserção de cargas com ajuste de potência pré-determinado, independentemente de sua natureza (predominantemente resistiva, indutiva ou capacitiva), facilitando a modelagem de cenários para estudo de fluxo de potência no ambiente ATP/ATPDraw.

4.3 Utilização como Fonte Interfaceada por Conversor

Tipicamente, fontes de geração baseadas em máquinas síncronas são modeladas por meio de equivalentes de Thévenin, fazendo uso de fontes de tensão em série com impedâncias. Eventualmente, em casos de barra infinita, como no cenário da Fig. 6, a impedância tem valor desprezível, podendo a fonte ser conectada diretamente ao circuito. Esse tipo de modelagem é o mais apropriado para tais

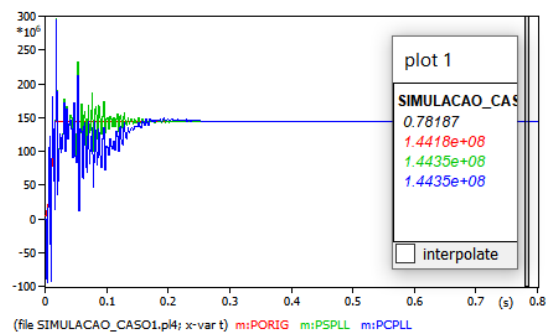


Figura 8. Comparação de P para os circuitos SS simulados, substituindo a carga pelo modelo de fonte proposto.

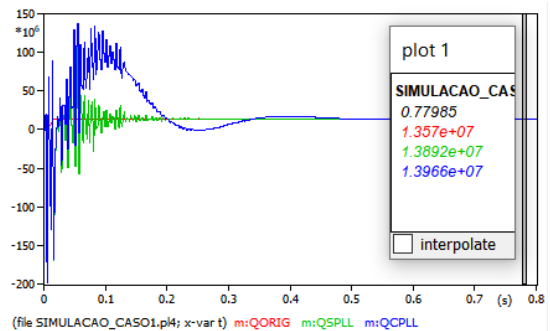


Figura 9. Comparação de Q para os circuitos SS simulados, substituindo a carga pelo modelo de fonte proposto.

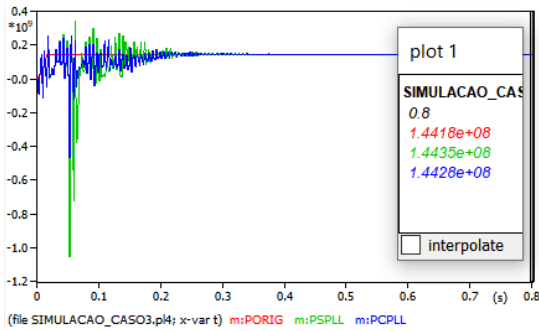


Figura 10. Comparação de P para os circuitos SS simulados, substituindo carga e reator pela fonte proposta.

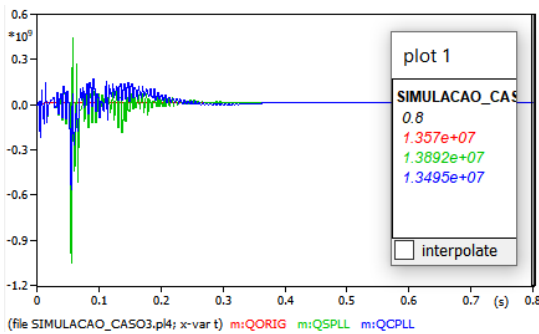


Figura 11. Comparação de Q para os circuitos SS simulados, substituindo carga e reator pela fonte proposta.

fontes síncronas, visto que elas ditam o comportamento das tensões no sistema, estabelecendo referências de módulo, ângulo e frequência para cargas e demais elementos da rede elétrica.

Diante do exposto, a priori, não é adequado representar plantas de geração síncrona pelo modelo proposto, visto que o mesmo opera com características de fonte de corrente. De fato, a substituição de uma fonte de tensão pelo modelo proposto faria com que esse último perdesse a referência de tensão, deixando de funcionar na etapa de síntese de correntes. Entretanto, apesar das limitações citadas, o modelo proposto é compatível com fontes de geração que operam com características de fonte de corrente, tal como fontes interfaceadas por conversores, a exemplo de plantas eólicas *Full Converter* e fotovoltaicas. Essas fontes operam tomando como referência uma tensão estabelecida pela rede elétrica, a partir da qual são estimadas as referências de tensão nos terminais de conexão das fontes, permitindo uma operação sob condições de potência controlada.

Em termos de estudos de fluxo de potência, a injeção de potência controlada é comum em programas destinados originalmente para esse fim. Porém, ao se utilizar o ATP/ATPDraw como ferramenta auxiliar, tomando proveito de sua gratuidade, são comuns dúvidas sobre as formas de modelagem de fontes eólicas do tipo *Full Converter* e fotovoltaicas, sendo esse esclarecimento uma das contribuições do presente trabalho. Tal tipo de estudo pode ser necessário em diversos cenários, incluindo casos em que plantas eólicas, fotovoltaicas e até de armazenamento operam em conjunto, formando o que se conhece como arranjo de geração híbrida.

Sabendo que fontes eólicas do tipo *Full Converter* e fotovoltaicas operam como fonte de corrente, elas são compatíveis ao modelo de fonte proposto. Para demonstrar tal aspecto, analisa-se o sistema da Fig. 7, considerando uma planta fotovoltaica ajustada para fornecer à rede elétrica 1 MW e 0 var. No modelo ATP/ATPDraw original, encontram-se implementados o inversor e seus controles. Assim, a intenção é demonstrar que, por meio do modelo de fonte desenvolvido, a planta fotovoltaica pode ser representada de maneira apropriada, desde que a rede elétrica mantenha condições de tensão estável. Nas Figs. 12 e 13, apresentam-se os resultados obtidos para P e Q , respectivamente, enquanto que na Fig. 14 ilustra-se uma região ampliada das correntes de saída.

Avaliando os resultados, nota-se que, após o período de inicialização da fonte controlada, as potências P e Q convergem para valores muito próximos aos esperados para o ponto de operação da planta fotovoltaica original. Assim,

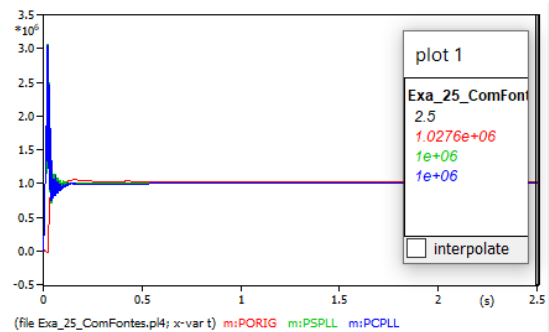


Figura 12. Análise de P quando do uso do modelo proposto para representação de planta fotovoltaica.

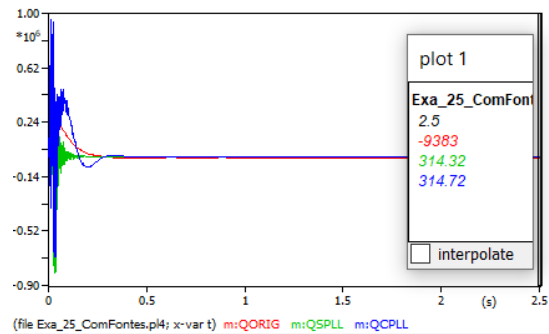


Figura 13. Análise de Q quando do uso do modelo proposto para representação de planta fotovoltaica.

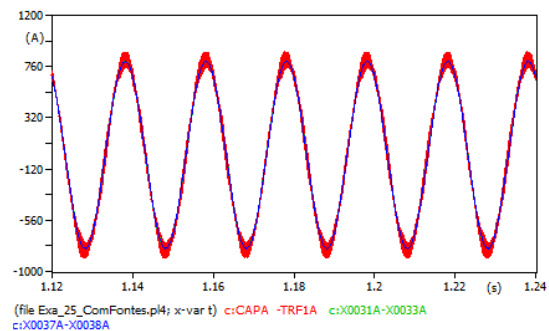


Figura 14. Correntes de saída de planta fotovoltaica quando modelada a partir da fonte proposta.

as condições de fator de potência são mantidas, comprovando a precisão e confiabilidade da fonte controlada desenvolvida, porém com a facilidade de se trabalhar com um modelo simplificado.

Outro aspecto que merece destaque diz respeito à representação do conteúdo harmônico na saída da planta fotovoltaica, o qual pode ser analisado na Fig. 14. No modelo original, em virtude dos chaveamentos do inversor, percebe-se a presença de distorções nos sinais, as quais não são representadas na saída da fonte proposta, embora a componente fundamental mantenha as suas características de módulo e ângulo. Tal comportamento já era esperado, visto que a fonte proposta não sintetiza as correntes de saída por meio de inversores, mas sim, calcula diretamente os valores instantâneos na frequência estimada/ajustada com base nas tensões impostas pela rede elétrica. Com isso, reconhece-se que o modelo proposto nesta versão não é adequado para estudos de qualidade da energia, transitórios eletromagnéticos ou curto-circuito, nos quais ocorrem variações relevantes nos sinais de tensão da rede. Ainda assim, do ponto de vista de uso do ATP/ATPDraw como ferramenta auxiliar para análises de fluxo de potência, o modelo proposto é de grande utilidade, pois representa apropriadamente a injeção de potência, respeitando as relações de módulo e ângulo das correntes de saída, sem requerer gastos com licenças de programas específicos e nem a modelagem detalhada dos conversores.

Por fim, em virtude das simplificações do modelo proposto, não há a necessidade de uso de passos de integração muito pequenos. Isso torna as simulações mais rápidas, mesmo que visualizadas no domínio do tempo, descartando-se o período de inicialização. Nesse sentido, sugere-se o uso de passos de integração entre $1 \mu s$ e $50 \mu s$ para estudos alternativos de fluxo de carga no ATP/ATPDraw.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresenta-se a modelagem no ambiente ATP/ATPDraw de um modelo de fonte de corrente controlada, a qual é capaz de controlar a injeção de potência em um dado nó elétrico. O desenvolvimento se contextualiza no uso do ATP/ATPDraw como ferramenta auxiliar para análises de fluxo de carga, tendo-se como motivação a gratuidade da licença da referida plataforma. Desse modo, a disponibilização de modelos para estudos diversos é de interesse por parte de pesquisadores, estudantes e profissionais do setor elétrico, justificando o objetivo do presente artigo.

Dois modelos foram apresentados, os quais diferem apenas do uso ou não de PLL para estimação da frequência das tensões de referência no lado da rede, cujas informações são usadas na síntese das correntes de saída da fonte. Para demonstrar o funcionamento da fonte proposta, consideraram-se cenários nos quais o modelo desenvolvido é usado na representação de cargas e, por fim, para representação de uma planta fotovoltaica, que possui todas as características de fontes de energia baseadas em inversores. Dos resultados, demonstra-se que o modelo desenvolvido é capaz de representar com boa precisão o fluxo de potência nos ramos em que se encontra conectado, requerendo apenas o ajuste de potências ativa e reativa, bem como o descarte das informações temporais obtidas

durante o período de inicialização da fonte. Com isso, identifica-se o modelo como sendo de grande utilidade para profissionais que desejam usar o ATP/ATPDraw como ferramenta alternativa para estudos de fluxo de carga, especialmente por permitir o ajuste de potências de forma direta, seja em cargas ou em fontes interfaceadas por conversores, sem necessitar de cálculos ou modelos complexos para representação destes elementos.

Em trabalhos futuros, espera-se evoluir o modelo proposto para análises de curto-circuito, incluindo, no caso de fontes interfaceadas por conversores, elementos de controle capazes de reproduzir a resposta dinâmica dessas unidades.

REFERÊNCIAS

- Dong, Y., Liu, W., Gao, Z., and Zhang, X. (2008). Study of a simulation model of ac constant power load. In *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, 1–5. doi:10.1109/TENCON.2008.4766537.
- Gérin-Lajoie, L. and Mahseredjian, J. (2009). Simulation of an extra large network in emtp: From electromagnetic to electromechanical transients. In *Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients (IPST)*, 2–6.
- Hatipoglu, K., Fidan, I., and Radman, G. (2012). Investigating effect of voltage changes on static zip load model in a microgrid environment. In *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–5. doi:10.1109/NAPS.2012.6336407.
- Höger, M., Širanec, M., and Altus, J. (2019). Power flow analysis of networks with loads of constant current - constant power factor type. In *2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1–4. doi:10.1109/EPE.2019.8777975.
- Jereminov, M., Hooi, B., Pandey, A., Song, H.A., Faloutsos, C., and Pileggi, L. (2019). Impact of load models on power flow optimization. In *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. IEEE.
- Jones, K.W., Pourbeik, P., Kobet, G., Berner, A., Fischer, N., Huang, F., Holbach, J., Jensen, M., O'Connor, J., Patel, M., et al. (2018). Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance. *Task Force on Short-Circuit and System Performance Impact of Inverter Based Generation, Tech. Rep. PESTR68*.
- Kim, I. and Harley, R.G. (2016). A study on power-flow and short-circuit algorithms capable of analyzing the effect of load current on fault current using the bus impedance matrix. In *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 1–3. doi:10.1109/EPEC.2016.7771690.
- Pequeno, L.E.B. (2010). Novas facilidades de operação do programa anarede. *Universidade Federal do Rio de Janeiro*.
- Stensby, J.L. (1997). *Phase-locked loops: Theory and applications*. CRC Press.
- Tamashiro, M., Peres, L., Piccini, A., and RESENDE, J.G.G. (2014). Avaliação de programas gratuitos para análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência. *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, Foz do Iguaçu*.