

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Desenvolvimento de um Controlador de Demanda de Energia Elétrica de Baixo Custo para a Greylogix Brasil

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa
Catarina*

*como requisito para a aprovação da disciplina:
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Gianvittorio Castellano

Florianópolis, julho de 2015

**Desenvolvimento de um Controlador de Demanda
de Energia Elétrica de Baixo Custo para a
Greylogix Brasil**

Gianvittorio Castellano

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
**DAS 5501: Estágio em Controle e Automação
Industrial**
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Banca Examinadora:

Eng. Rafael Gonçalves d'Ávila da Silva
Orientador da empresa

Professor Max Hering de Queiroz, Dr.
Orientador do curso

Professor Júlio Elias Normey Rico, Dr.
Responsável pela disciplina

Professor Hector Bessa Silveira, Dr.
Responsável pela disciplina

Professor, Dr.
Avaliador

ALUNO 1
Debatedor

ALUNO 2
Debatedor

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu gostaria de agradecer aos meus pais, Lucília Costa e Vittorio Castellano, que têm sido meus alicerces e ensinaram-me que o único limite para a realização de nossos sonhos é o que nossa própria mente impõe.

Posteriormente, eu gostaria de agradecer ao responsável pela oportunidade de trabalhar neste projeto vinculado na Greylogix, e meu orientador em tal empresa: Eng. Rafael Gonçalves d'Ávila da Silva, Diretor Técnico. Através deste pude adquirir um conhecimento mais avançado em programação de controladores lógicos programáveis, bem como no de redes industriais.

Finalmente gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Max Hering de Queiroz por ter sido meu orientador na realização deste meu projeto de fim de curso.

Eu não poderia me esquecer de deixar um agradecimento em particular ao Eng. William Andrey Faustino Scotti, trainee na própria Greylogix. Através de seu auxílio, pude me aprofundar na síntese de controladores supervisórios modulares, tema de seu mestrado.

Agradecimientos

RESUMO

Diversas empresas vêm investindo no desenvolvimento de novas tecnologias que lhes permitam reduzir substancialmente o consumo de energia em suas instalações e conseqüentemente custos, incrementando assim seus lucros. Além do mais, a adoção de tal política de consciência energética acaba por tornar-se um diferencial no mercado consumidor. O projeto descrito ao longo deste documento abordará conceito de eficiência energética e seu vínculo com a medição do consumo de energia elétrica e seu faturamento pelas concessionárias, para então propor uma alternativa simples e barata para o gerenciamento deste consumo. Solução proposta que se traduz em desenvolver o protótipo de um controlador de baixo custo embarcado em um controlador lógico programável (CLP), visando atender a consumidores que buscam trabalhar com CLPs de pequeno e médio porte. Foi realizado um estudo a respeito de métodos já implementados comercialmente com o propósito de desenvolver uma heurística intuitiva que fosse capaz de definir quais equipamentos em funcionamento em uma dada instalação deveriam ser desligados ou acionados, de modo a controlar a demanda de energia, i.e., manter o consumo abaixo de um certo limite previamente estabelecido. Em virtude de questões de segurança como tempo em funcionamento dos equipamentos e a possibilidade de um operador humano ser capaz de desabilitar a atuação do algoritmo de controle de demanda, fez-se uso da teoria de controle supervisório com o intuito de impor tais restrições de coordenação ao funcionamento do sistema como um todo. Finalmente, montou-se uma simples bancada composta basicamente por alguns equipamentos e um CLP. O algoritmo de controle da demanda projetado, embarcado neste CLP, atuou sobre a alimentação dos equipamentos ligados à rede elétrica com o intuito de manter o consumo abaixo de um certo limite. Para melhor inferir sobre o desempenho do sistema implementado, criou-se um sistema SCADA de interface intuitiva que permitisse a edição de parâmetros e visualizar graficamente o comportamento do consumo em função do tempo. O sistema mostrou-se extremamente eficiente e robusto quanto a situações adversas, sendo sua performance degradada apenas quando houve um número grande de equipamentos providos de requisitos de tempo máximo desligados e mínimo ligados, que forçaram o controlador a ligá-los mesmo quando não permitido.

ABSTRACT

Several companies have been investing in developing new technologies that allow them to substantially reduce energy consumption in its facilities and therefore costs, thus increasing their profits. Moreover, the adoption of such energy conscious policy ultimately become a differentiator in the consumer marketplace. The project described throughout this document will address the concept of energy efficiency and its link to the measurement of energy consumption and its sales by concessionaires, and then propose a simple and inexpensive alternative to the management of this consumption. Proposed solution which translates to develop the prototype of a low-cost embedded controller in a programmable logic controller (PLC) to meet the consumers who seek to work with small and medium-sized PLCs. It was conducted a study on methods already commercially deployed in order to develop an intuitive heuristic that were capable of defining what equipment operating in a given installation were to be turned off or fired, in order to control energy demand, i.e., keep consumption below a certain predetermined limit. Due to security issues such as uptime of equipment and the possibility of a human operator is able to disable the operation of the demand control algorithm, was made use of supervisory control theory in order to impose coordination restrictions to the operation of the system as a whole. Finally, it was set up a simple bench made up mainly of some equipment and a PLC. The control algorithm of projected demand, embedded in the PLC, acted on the power of devices connected to the grid in order to keep consumption below a certain limit. In order to better infer the performance of the implemented system, it was set up a SCADA system provided with an intuitive interface that allows editing parameters and graphically display the consumption behavior as a function of time. The system proved to be extremely efficient and robust for adverse situations, having its performance degraded only when working with a great number of equipments provided with maximum time off and minimum time on requirements, which cause the controller plug them even when not allowed.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 GREYLOGIX BRASIL	17
1.3 OBJETIVOS GERAIS	18
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.5 RELAÇÃO COM O CURSO	20
1.6 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	20
2 O CONTROLE DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	23
2.2 A ESTRUTURA TARIFÁRIA EM VIGOR	23
2.3 MEDIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA	26
2.4 CARGAS	27
2.5 RELÉS	27
2.6 CLPS	29
2.6.1 Princípios de Funcionamento	32
2.6.2 Programação de CLPs	33
2.6.3 CLP SIMATIC S7-1200	33
3 DESENVOLVIMENTO DE HEURÍSTICA PARA O CONTROLE DA DEMANDA	35
3.1 ALTERNATIVAS ALGORÍTMICAS EXISTENTES PARA O CONTROLE DA DEMANDA	35
3.1.1 Algoritmo de Janela Móvel	36
3.1.2 Algoritmo de Retas de Carga	36
3.1.3 Método Preditivo Adaptativo	37
3.2 ESTRUTURA GERAL DO ALGORITMO	39
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO	43
4 CONTROLE SUPERVISÓRIO	45
4.1 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO	45
4.1.1 Autômatos Determinísticos de Estados Finitos	46
4.1.2 Metodologia para a Síntese de Supervisores Ótimos	47
4.1.3 Controle Modular Local	48
4.2 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	49

4.3	MODELAGEM E SÍNTESE DA LÓGICA DE SUPERVISÃO	50
4.3.1	Sistema Produto	50
4.3.1.1	Carga	51
4.3.1.2	Controle	53
4.3.2	Especificações	54
4.3.3	Modelagem das Especificações 2 e 3 - E_2	54
4.3.4	Síntese dos Supervisores	55
4.4	IMPLEMENTAÇÃO EM CLP	57
4.4.1	Geração do Código	58
5	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	63
5.1	MONTAGEM DA BANCADA	63
5.2	CIRCUITO DE ACIONAMENTO	64
5.3	SISTEMA SCADA	65
6	RESULTADOS	69
6.1	TESTES	69
6.2	CENÁRIO 1 - SEM ATRIBUTOS DE TEMPOS	70
6.3	CENÁRIO 2 - CONTROLE DESABILITADO PARA UMA CARGA	72
6.4	CENÁRIO 3 - CARGA ACIONADA MANUALMENTE POR UM OPERADOR	73
6.5	CENÁRIO 4 - COM ATRIBUTOS DE TEMPOS	74
6.6	CENÁRIO 5 - DEMANDA NULA	75
7	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.4. Esquema de acionamento de um motor elétrico universal. Fonte: (NETTO, 1999).	28
Figura 2.5. Esquema de funcionamento de um relé (BRAGA, 1998).	28
Figura 2.5. Relés normalmente aberto, normalmente fechado e comutador de corrente (BRAGA, 1998).	29
Figura 2.5. Aplicação de relé de contato simples para controle liga/-desliga de um circuito externo (BRAGA, 1998).	30
Figura 2.6. Exemplo de uso de um CLP. (CUNHA, 2005).	30
Figura 2.6. Anatomia de um CLP (CUNHA, 2005).	31
Figura 2.6. Módulo de entrada analógica (CUNHA, 2005).	31
Figura 2.6. Módulo de saída analógica (CUNHA, 2005).	32
Figura 2.6. Módulo de entrada analógica (CUNHA, 2005).	32
Figura 2.6. Módulo de saída analógica (CUNHA, 2005).	32
Figura 2.6. CLP Siemens S7-1200	34
Figura 3.1. Método de medição assíncrona por janela móvel (NUNES, 2012).	36
Figura 3.1. Algoritmo de retas de carga (NUNES, 2012).	37
Figura 3.1. Algoritmo preditivo adaptativo (NUNES, 2012).	38
Figura 3.2. Diagrama de blocos referente à topologia de controle da demanda para 10 cargas.	39
Figura 4.1. SED em malha fechada (CURY, 2001).	46
Figura 4.3. Arquitetura de controle completa para duas cargas.	50
Figura 4.3. Modelagem do comportamento de uma carga por ADEFs.	52
Figura 4.3. Modelagem do comportamento do controle para uma carga por ADEFs.	53
Figura 4.3. Modelagem de E_2 por ADEFs.	54
Figura 4.3. Planta G_2	56
Figura 4.3. \mathcal{R}_2 (Comportamento de G_2 restrito por E_2).	56
Figura 4.3. Supervisor 2 a restringir o comportamento da planta G_2 conforme desejado.	57
Figura 4.4. Instância de um FB.	58
Figura 4.4. Geração de código no IDES2ST.	59
Figura 5.1. CLP SIMATIC S7-1200 e relés encaixáveis devidamente	

montados sobre um trilho DIN.....	63
Figura 5.1. Conjunto de cargas físicas.....	64
Figura 5.2. Esquema elétrico de acionamento de uma única carga..	65
Figura 5.3. Arquitetura básica de um sistema SCADA (INDUCTIVE AUTOMATION, 2015).....	66
Figura 5.3. Tela de Monitoramento.	67
Figura 5.3. Tela de edição de parâmetros individuais das cargas....	67
Figura 6.1. Resposta temporal de $P(t)$	71
Figura 6.2. Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o primeiro cenário.....	71
Figura 6.2. Integral do erro em função do tempo para o primeiro cenário.	71
Figura 6.3. Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o segundo cenário.....	72
Figura 6.3. Integral do erro em função do tempo para o segundo cenário.	72
Figura 6.4. Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o terceiro cenário.	73
Figura 6.4. Integral do erro em função do tempo para o terceiro cenário.	73
Figura 6.5. Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o quarto cenário.	74
Figura 6.5. Integral do erro em função do tempo para o quarto cenário.	74
Figura 6.6. Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o quinto cenário.....	75
Figura 6.6. Integral do erro em função do tempo para o quinto cenário.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estrutura Tarifária Grupo A	24
Tabela 2	Estrutura Tarifária Grupo B	24
Tabela 3	Algumas Especificações Técnicas do SIMATIC S7-1200 (CPU 1214 DC/DC/Rly):.....	34

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos dias de hoje, diversas empresas vêm investindo cada vez mais em eficiência energética, i.e., manter um crescimento sustentável por meio de instalações mais eficientes. Tal propósito traduz-se nas seguintes melhorias:

- Busca por um equilíbrio sustentável entre as novas tecnologias e a adequada exploração das convencionais;
- Redução na emissão de poluentes industriais como mercúrio, chumbo, enxofre, óleos derivados de petróleo, ácidos, etc.

Tais melhorias são obtidas a partir da diminuição no consumo de energia, que se reflete em menores custos de operação (ARAGÓN, 2011). Além disso, a competitividade no mercado de empresas que adotam tal política tende a aumentar, pois já é visto como um diferencial positivo aos olhos dos consumidores.

No Brasil as concessionárias vendem, conforme estrutura tarifária vigente, uma franquia fixa em energia elétrica às unidades consumidoras. Valores de multa de até 3 vezes o de horário de ponta são cobrados caso a demanda consumida média venha a ser maior do que a contratada. Tal verificação é realizada periodicamente.

Logo, o desenvolvimento de dispositivos a racionalizar o consumo de energia em indústrias e residências representa uma alternativa não apenas viável, como necessária. Introduzir um produto com tal propósito, a um custo reduzido, seria um atrativo para consumidores que não possuem recursos econômicos e interesse em investir em soluções repletas de funcionalidades, como uma identificação precisa das fontes responsáveis pelo consumo excessivo e geração de relatórios, porém a preços abusivos.

1.2 GREYLOGIX BRASIL

A Greylogix Brasil é uma empresa de origem alemã, fornecedora de soluções em engenharia ramificada por diversas cidades do sul do País desde novembro de 2007: Mafra (Matriz), Canoinhas, Joinville, Blumenau, Florianópolis em Santa Catarina; Curitiba e Rio Negro no Paraná.

Hoje, a empresa conta com aproximadamente 50 funcionários e proporciona a seus clientes uma vasta gama de serviços, dentre os quais:

- Projeto executivo de automação;
- Desenvolvimento de software;
- Engenharia elétrica;
- Engenharia básica;
- Engenharia de detalhamento;
- Consultoria;
- Análise financeira (TCO, ROI);
- Manutenção;
- Serviços de campo.

No Brasil, a Greylogix atua prevalentemente nos setores alimentício, papel-celulose, metalmecânico, automobilístico, calor e energia.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

Existem atualmente diversos produtos com a função de realizar o controle da demanda de energia elétrica consumida, como é o caso do *Powerrate* da Siemens. No entanto, este é destinado a clientes que já utilizem CLPs Siemens de médio e grande porte.

O objetivo geral do presente projeto é o de desenvolver o protótipo de um controlador de baixo custo, embarcado em um *controlador lógico programável* (CLP), visando atender à consumidores que visem trabalhar com CLPs de pequeno porte.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O problema está essencialmente em garantir que a demanda consumida em uma dada fábrica/residência, com diversos equipamentos em funcionamento, seja sempre igual ou menor do que a demanda contratada junto à concessionária. Isto para aproveitar ao máximo tal franquia e não estar sujeito a multas severas.

Como o controlador atuaria apenas liberando ou bloqueando equipamentos para acionamento, visando apenas manter o consumo abaixo da demanda, outro problema surge: alguns equipamentos não podem ser acionados ou desligados arbitrariamente. É o caso de um motor elétrico, que consome uma corrente acima da nominal durante a partida, sendo assim inviável desligá-lo e acioná-lo logo em seguida. Liquidificadores, por exemplo, têm de permanecer ligados durante um intervalo de tempo mínimo de modo a triturar adequadamente os alimentos. Outro caso problemático seria o de um condicionador de ar, que não poderia permanecer desligado durante tempo demais, para não causar desconforto nas pessoas dentro do ambiente climatizado por este.

Além do mais, um operador humano pode simplesmente escolher ignorar o sistema e acionar/desligar um equipamento como bem entender, se desabilitar o sistema para tal carga.

Assim, faz-se necessários inserir alguns critérios na lógica do controlador como:

- Atribuição de prioridades na ordem de acionamento/desligamento de equipamentos;
- Aguardo de um tempo mínimo para desligar e acionar novamente e viceversa;
- Atribuição de um tempo mínimo para se manter acionado e um tempo máximo para se manter desligado.

A proposta escolhida pelo presente projeto foi a de desenvolver uma heurística que se ocupasse apenas de "varrer" os equipamentos disponíveis, dadas certas prioridades e calculasse quais cargas deveriam permanecer liberadas.

Quanto às questões de tempos envolvidos e a possibilidade do operador tomar o controle dos equipamentos sobre o sistema optou-se por utilizar a *Teoria de Controle Supervisório* a fim de impor tais restrições de segurança à execução do algoritmo de controle de demanda.

Finalmente realizou-se uma série de testes tanto em ambiente simulado quanto em uma bancada com equipamentos reais em funcionamento, para que se pudesse inferir sobre os ganhos com o uso da estratégia proposta.

1.5 RELAÇÃO COM O CURSO

No projeto foram envolvidas diversos conteúdos estudados ao longo do curso de engenharia de controle e automação, dentre as quais podemos citar:

- Algoritmos - Concepção de uma heurística de acionamento/desligamento dos equipamentos, envolvendo ordenação e varredura (Introdução à Informática para Automação e Fundamentos da Estrutura da Informação);
- Métodos Numéricos - Cálculo de integrais numéricas e noções de complexidade computacional (Cálculo Numérico);
- Arquitetura e programação de CLPs (Informática Industrial I);
- Circuitos Elétricos - Definição de potências aparente, ativa e reativa;
- Teoria de Controle Supervisório - Abstração das restrições de funcionamento do algoritmo de controle de demanda como um *sistema a eventos discretos* (SED) (Modelagem e Controle de Sistemas Automatizados).

1.6 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Os capítulos da presente monografia estão divididos basicamente da seguinte forma:

1. **Introdução** - Motivos que levaram à investigação sobre o tema de controle da demanda de energia elétrica junto à Greylogix Brasil, descrição dos objetivos geral e específicos a serem alcançados, bem como uma ponte com as disciplinas do curso de engenharia de controle e automação;
2. **Controle da Demanda de Energia Elétrica** - Introdução ao conceito de eficiência energética e sua conexão com o controle da demanda e descrição sobre o faturamento do consumo. Abordagem de conceitos referentes aos hardwares e dispositivos eletrônicos utilizados;
3. **Desenvolvimento de uma Heurística para o Controle da Demanda** - Análise de técnicas empíricas já existentes para o

controle da demanda e posterior concepção de um algoritmo intuitivo a utilizar o conceito de potência consumida média, a fim de obter um melhor desempenho do que as técnicas já estudadas;

4. **Controle Supervisório** - Uso da teoria de controle supervisório com o intuito de impor restrições de coordenação ao sistema de controle da demanda para que este funcione de uma maneira segura;
5. **Construção do Protótipo** - Montagem de uma bancada didática a demonstrar a factibilidade de tal produto a baixo custo;
6. **Resultados** - Realização de testes funcionais através do monitoramento do consumo médio para inferir sobre o desempenho do sistema projetado.
7. **Conclusão** - Análise do atendimento ou não dos requisitos de projeto, bem como dos resultados obtidos. Implementação futura de outras soluções.

2 O CONTROLE DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA

O capítulo faz uma conexão entre o conceito de *eficiência energética* e o *consumo* de energia elétrica, bem como uma descrição sobre a estrutura tarifária em vigor para o faturamento deste. Por último, aborda os conceitos de *carga*, *relé* e *CLP*, por serem utilizados na implementação física do presente projeto.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2015), o termo *eficiência energética* corresponde a "utilizar menos energia para realizar o mesmo serviço". Há diversas outras definições, contudo essa é suficientemente simples e direta do ponto de vista operacional.

Uma forma de melhor entender tal conceito é através de exemplos: ao substituirmos um eletrodoméstico como um refrigerador ou uma máquina lavadora de roupas, por exemplo, por modelos mais eficientes do ponto de vista energético, obtemos o mesmo serviço consumindo menos energia. Onde quer que a energia seja utilizada, há oportunidades de aumentar sua eficiência. Na maioria dos casos, medidas de eficiência energética pagarão a si mesmas ao longo do tempo sob forma de economia nas contas a se pagar. O quão depressa tais medidas pagarão seus investimentos depende de diversos fatores, como o custo da energia e o quão frequentemente são utilizadas - por exemplo, quantas horas um dado equipamento permanece ligado. As condições do tempo também representam um fator importante quando um equipamento para o controle de temperatura, como um condicionador de ar, é usado.

2.2 A ESTRUTURA TARIFÁRIA EM VIGOR

Segundo (OZUR; PEREIRA; CORREA, 2012), para que um sistema de gerenciamento de energia elétrica possa ser implantado, é necessário um disernimento sobre a estrutura tarifária atual do consumo de energia elétrica no país. Os consumidores estão divididos em dois grupos de acordo com a tensão de fornecimento.

Os consumidores do grupo A (alta tensão) estão ligados a tensões iguais ou superiores a 2.3 kV, subdivididos conforme tabela 1.

Tabela 1 – Estrutura Tarifária Grupo A

Subgrupo A1	Subgrupo A2	Subgrupo A3	Subgrupo A4	Subgrupo AS
230 kV ou mais	88 a 138 kV	69 kV	2.3 a 25 kV	Subterrâneo (Redes Elétricas Subterrâneas)

Já os consumidores do grupo B (baixa tensão) consistem nos consumidores ligados a tensões inferior a 2.3 kV (110V, 220V e 440V) subdivididos conforme tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura Tarifária Grupo B

Subgrupo B1	Subgrupo B2	Subgrupo B3	Subgrupo B4
Residencial e Residencial de Baixa Renda	Rural, Cooperativa de Eletrificação Rural e Serviço Público de Irrigação	Demais Classes	Iluminação Pública

A modalidade *Horo-Sazonal* é a comumente empregada e caracteriza-se pela aplicação de tarifas diferenciadas, levando em conta o consumo de energia elétrica e a demanda de potência variáveis com o horário de utilização e diferentes períodos do ano. As tarifas *verde* e *azul* serão explicadas a seguir, contudo, alguns conceitos deverão ser introduzidos previamente:

- **Horário de ponta:** intervalo de 3 horas diárias consecutivas, definido pela concessionária, de segunda a sexta;
- **Horário fora de ponta:** intervalo de tempo em horas complementar ao horário de ponta, somado ao total de horas decorrentes de sábados, domingos e feriados nacionais;
- **Demanda medida:** corresponde à média, calculada durante um intervalo de tempo especificado $\Delta t = t_2 - t_1$, das potências ativas ou reativas, expressa em kW solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora.

Tal potência média pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\bar{P} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t)dt}{\Delta t} = \frac{U(\Delta t)}{\Delta t} \quad (2.2.1)$$

sendo Δt o intervalo de tempo (comumente de 15 minutos), U a energia elétrica consumida pela carga durante tal intervalo e \bar{P} a potência média;

- **Demanda contratada:** valor a ser continuamente disponibilizado pela concessionária, por obrigatoriedade. Sendo o valor contratado pelo consumidor pago à concessionária independentemente de sua utilização;
- **Período de Integração:** intervalo de tempo ao final do qual a concessionária envia um pulso à unidade consumidora, de modo a avisar que está medindo sua potência consumida média;
- **Período seco:** intervalo de 7 meses consecutivos, que correspondem aos fornecimentos dados pelas leituras dos medidores, referentes aos meses compreendidos entre maio e novembro;
- **Período Úmido:** intervalo de 5 meses consecutivos, referente aos fornecimentos determinados pelas leituras dos medidores, durante o intervalo entre os meses de dezembro de um certo ano a abril do ano seguinte.

A tarifa *verde* é uma modalidade a ser aplicada somente a unidades consumidoras que operam com tensões inferiores a 69 kV (grupos A3, A4 e AS), fazendo-se necessário um contrato específico, com as seguintes características:

- Um único valor de demanda em kW, independente do posto horário (ponta ou fora de ponta), sendo-lhe aplicada uma única tarifa;
- Durante o período de faturamento, a demanda faturável será dada pelo maior valor entre a contratada e a medida;
- Um único valor de tarifa em caso de ultrapassagem de demanda.

A tarifa *azul* corresponde à modalidade que possui aplicação compulsória para as unidades consumidoras atendidas em tensão maior ou igual a 69 kV (grupos A1, A2 e A3), sendo opcionais para os demais consumidores. Exige a estipulação de um contrato específico entre a distribuidora de energia e o consumidor, destacando-se as seguinte cláusulas:

- Dois valores de demanda em kW, um para o horário de ponta e outro para o de fora de ponta;
- Para cada posto horário é aplicada uma tarifa diferente, sendo a tarifa de ponta 3 vezes maior do que a de fora de ponta;
- Durante o faturamento, a demanda faturável será o maior valor entre a demanda contratada e a medida em cada posto horário.
- São aplicadas tarifas diferentes para o horário de ponta e o fora de ponta, em caso de ultrapassagem da demanda contratada.

2.3 MEDIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

Segundo (NUNES, 2012), a potência elétrica, medida em Watts, corresponde ao produto entre as grandezas de tensão, em Volts e a corrente elétrica, em Ampères, que percorre um dado dispositivo.

Assim, a medição da potência elétrica é feita através de um instrumento que meça tensão e corrente instantâneas, realizando o produto entre estas para se obter a potência, i.e., uma medição *indireta*. Dependendo da maneira de como esse produto é feito, pode-se obter a medição de potência ativa, reativa ou aparente.

Medidores de potência empregados em circuitos de corrente alternada são capazes de realizar a separação vetorial da potência real ou ativa e da potência imaginária ou reativa.

Para a medição da potência ativa, considera-se apenas a componente real da potência aparente, segundo a equação

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2.3.1)$$

Enquanto que a potência reativa é obtida pela equação

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2.3.2)$$

sendo V a amplitude da tensão em volts, I a da corrente em ampères e ϕ a fase.

A energia consumida pode ser obtida matematicamente rearranjando os termos da eq.(2.2.1), i.e., através da integração da potência exigida pela unidade de consumo durante um certo intervalo de tempo $\Delta t = (t_2 - t_1)$:

$$U(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (2.3.3)$$

Isso corresponde à energia consumida, medida em Joules. Comercialmente, a unidade empregada é kWh (quilo-Watt-hora).

2.4 CARGAS

O termo *carga* refere-se a qualquer dispositivo que dissipe potência em um circuito elétrico, seja sob forma de calor como o resistor por *Efeito Joule* ($P = R \cdot I^2$) ou para movimentar uma massa (gerar torque ou força), como motores elétricos.

Motores elétricos representam as cargas mais comuns. Sua rotação inerente é a base de funcionamento de diversos equipamentos industriais (misturadores, fresadoras, tornos, etc.) e eletrodomésticos (batedeiras, ventiladores, etc.).

Alguns motores operam em corrente contínua (DC), podendo ser alimentados por pilhas, baterias ou até fontes de alimentação adequadas. Outros operam em corrente alternada (AC). Estes são compostos basicamente por dois componentes: rotor e estator (vide fig. 2.4.1). O rotor precisa de um torque (momento) para iniciar seu giro, sendo este produzido por forças de natureza magnética geradas entre os pólos do rotor e do estator. Essas forças de "atração" e "repulsão" deslocam os pólos móveis do rotor, produzindo torques, que fazem o rotor girar a uma velocidade cada vez maior, até que o atrito reduza a velocidade a zero. Neste momento, o rotor passa a girar com velocidade constante (NETTO, 1999).

Como o torque é função direta da corrente que percorre as bobinas, o sentido de rotação depende do sentido de tal corrente.

A potência consumida por um motor elétrico varia de acordo com o torque necessário para movimentar uma massa com uma certa impedância mecânica, drenando mais corrente quanto maior esta for.

2.5 RELÉS

O sinal vindo de uma saída digital de um *controlador lógico programável* (CLP) energiza um relé, que fecha o contato da referente carga, que é então acionada.

Segundo (BRAGA, 1998), os relés são dispositivos comutadores eletromecânicos. Nas proximidades de um eletroímã é instalada uma armadura móvel, que possui o intuito de fechar um conjunto de contatos. Quando percorrida por uma corrente elétrica, a bobina cria

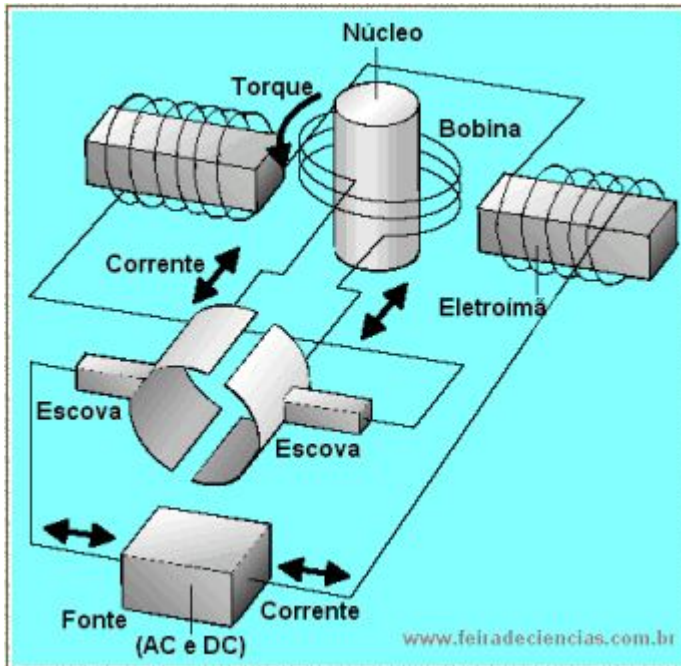


Figura 2.4.1 – Esquema de acionamento de um motor elétrico universal.
Fonte: (NETTO, 1999).

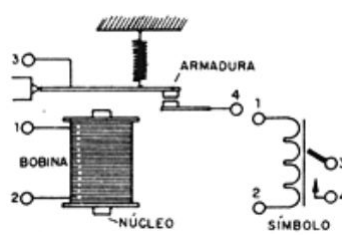


Figura 2.5.1 – Esquema de funcionamento de um relé (BRAGA, 1998).

um campo magnético que atrai a armadura (vide fig. 2.5.1). Desta maneira, ocorre um movimento que ativa os contatos, que podem ser abertos (aqui utilizados), fechados ou comutados, dependendo de sua posição (vide fig. 2.5.2).

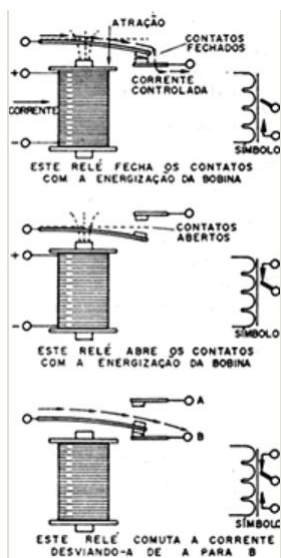


Figura 2.5.2 – Relés normalmente aberto, normalmente fechado e comutador de corrente (BRAGA, 1998).

Logo, através de uma tensão ou corrente de controle aplicada à bobina de um relé, é possível abrir, fechar o comutar os contatos de modo a controlar as correntes que circulam por circuito externos (vide fig. 2.5.3). Quando corrente deixa de circular pela bobina, o campo magnético criado desaparece e a armadura volta à sua posição inicial em virtude da mola.

2.6 CLPS

Segundo (CUNHA, 2005), *Controladores Lógicos Programáveis* (CLPs) são computadores de pequeno porte, autocontidos e e robustos, projetados para controlar processos em ambiente industrial (vide fig. 2.6.1).

Cada CLP possui um microprocessador interno, programado para

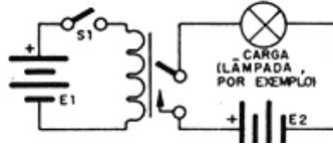


Figura 2.5.3 – Aplicação de relé de contato simples para controle liga/-desliga de um circuito externo (BRAGA, 1998).

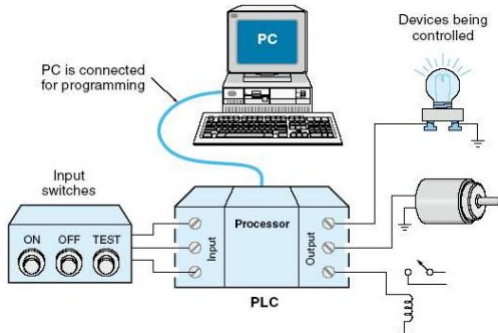


Figura 2.6.1 – Exemplo de uso de um CLP. (CUNHA, 2005).

dirigir os terminais de saída de uma maneira especificada, de acordo com os valores dos terminais de entrada (vide fig. 2.6.2).

Os componentes básicos de um CLP são:

- Fonte de alimentação;
- Processador (CPU);
- Memória de programa;
- Memória de dados;
- Módulos de entrada/saída;
- Módulos de *plug in* (separados);
- Barramento do CLP.

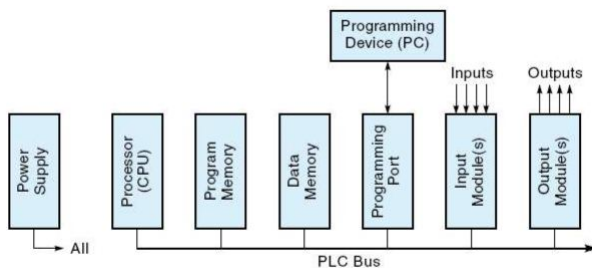


Figura 2.6.2 – Anatomia de um CLP (CUNHA, 2005).

Os CLPs apresentam conversores A/D (análogo-digital) nas entradas analógicas (fig. 2.5.3) e D/A (digital-analógico) nas saídas analógicas (fig. 2.5.4).

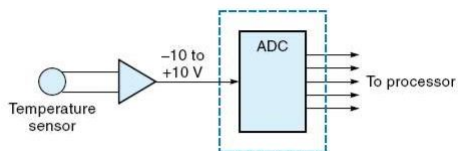


Figura 2.6.3 – Módulo de entrada analógica (CUNHA, 2005).

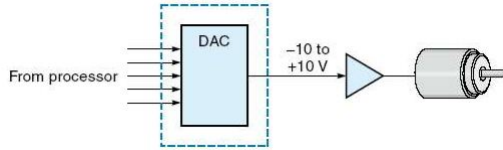


Figura 2.6.4 – Módulo de saída analógica (CUNHA, 2005).

Os módulos de entrada digitais trabalham comumente com sinais de tensão de 5 ou 24V (fig. 2.5.5). As saídas digitais podem ser utilizadas para alimentar lâmpadas, relés (fig. 2.5.6) e pequenos motores.

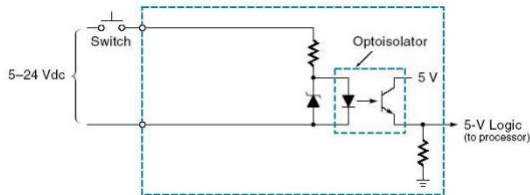


Figura 2.6.5 – Módulo de entrada analógica (CUNHA, 2005).

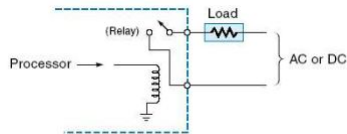


Figura 2.6.6 – Módulo de saída analógica (CUNHA, 2005).

2.6.1 Princípios de Funcionamento

A CPU realiza ciclicamente:

- Leitura das entradas e respectiva armazenagem na *memória intermediária de entrada* (MIE);
- Execução do programa de controle do usuário;

- Atualização da saída, com base nos valores armazenados na *memória intermediária de saída* (MIS).

Este ciclo de varredura pode ser interrompido por interrupções ou *watchdog*.

2.6.2 Programação de CLPs

O programa de controle do usuário nada mais é do que um conjunto de expressões booleanas, que são processadas sequencialmente a cada ciclo de varredura. O resultado é armazenado na memória intermediária do CLP. Ao terminar o processamento, o conteúdo da memória intermediária de saída é copiada nas saídas.

Conforme norma IEC 1131-3, CLPs suportam concepção de programas de usuário em linguagens gráficas como *Sequential Function Chart* (SFC) (equivalente ao GRAFCET), *Ladder Diagram* (LD) e *Function Block Diagram*. Além disso, suporta linguagens textuais como *Instruction List* (IL) e *Structured Text* (ST).

2.6.3 CLP SIMATIC S7-1200

O CLP SIMATIC S7-1200 da Siemens (vide fig. 2.6.7), CPU 1214C DC/DC/Rly, foi o escolhido para a implementação da lógica de controle no presente projeto.

Este apresenta as seguintes especificações técnicas que se fazem pertinentes:

Tabela 3 – Algumas Especificações Técnicas do SIMATIC S7-1200 (CPU 1214 DC/DC/Rly):

Alimentação	24V DC
Potência	12 W
Memória de Trabalho	75 kbyte
Memória de Carga	4 Mbyte
Backup sem Bateria	Sim
Tempo de Processamento CPU (bit)	0.085 μ s/instrução
Tempo de Processamento CPU (word)	1.7 μ s/instrução
Tempo de Processamento CPU (float)	2.5 μ s/instrução
Área de Dados	8 kbytes
Área de Endereços	1 kbyte (entradas e saídas digitais)
Hora e Data	clock tempo real em hardware
Entradas Digitais	14
Saídas Digitais	10
Entradas Analógicas (Tensão)	2; 0 a 10V
Arquitetura Rede	Ethernet
Frequência Limite	100 kHz
Linguagens de Programação	LAD; FBD; SCL
Nº Máximo de Módulos por Sistema	3 de comunicação; 8 de sinal



Figura 2.6.7 – CLP Siemens S7-1200

3 DESENVOLVIMENTO DE HEURÍSTICA PARA O CONTROLE DA DEMANDA

O capítulo a seguir busca apresentar alguns dos métodos existentes para o controle da demanda, para então descrever a fundamentação matemática por trás da concepção de uma heurística simples, seguida de uma análise do código quanto à sua lógica e complexidade computacional.

3.1 ALTERNATIVAS ALGORÍTMICAS EXISTENTES PARA O CONTROLE DA DEMANDA

Conforme exposto no capítulo 2, (OZUR; PEREIRA; CORREA, 2012) afirma que a demanda nada mais é do que uma média das potências solicitadas ao sistema elétrico pela carga instalada na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado. Tal intervalo de tempo é denominado de *intervalo de integração*, comumente definido como sendo de 15 minutos.

Quanto à medição da demanda, existem os métodos síncronos e assíncronos. O método de medição síncrona é o utilizado por todas as concessionárias brasileiras, bem como grande parte dos outros países, medindo a energia ativa durante o intervalo de integração.

Segundo (NUNES, 2012), um controlador de demanda consiste em um equipamento eletrônico cujo propósito é manter a demanda de energia ativa de uma unidade consumidora dentro de valores limite pré-estabelecidos, atuando, caso necessário, sobre alguns equipamentos (cargas) instalados. Tal controle é fundamental não apenas para o consumidor, que pode assim reduzir gastos com o consumo de energia elétrica, mas também para a concessionária, que desta maneira consegue garantir fornecimento ininterrupto e de qualidade.

Controladores de demanda podem, basicamente, ser divididos em dois grupos: *covencionais* e *inteligentes*. Um controlador de demanda convencional pode atuar de forma prematura ou intermitente durante o intervalo de integração, pois faz uso de medição por média móvel e controle "on/off", ou até por projeção simples. Já um controlador inteligente busca postergar ao máximo sua atuação, possibilitando a queda "natural" da demanda, pois baseia-se em um método de medição preditivo mais complexo.

3.1.1 Algoritmo de Janela Móvel

Consiste em um método de medição assíncrona (não depende do sinal de sincronismo a ser enviado pela concessionária). Resume-se a um filtro de média móvel, que "caminha" a cada período de atuação do controlador trazendo todo o histórico do período de integração anterior (funciona analogamente a um buffer) (NUNES, 2012). A medição

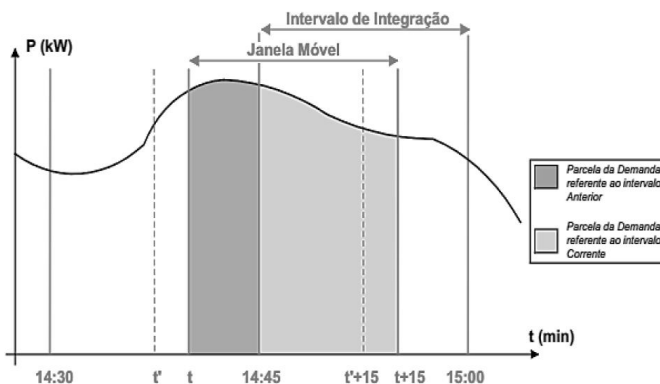


Figura 3.1.1 – Método de medição assíncrona por janela móvel (NUNES, 2012).

por janela móvel traz consigo um valor médio acumulado do período imediatamente anterior em vez de zerar tal valor, como realizado em medições síncronas (vide fig. 3.1.1).

3.1.2 Algoritmo de Retas de Carga

Tal método realiza a composição da curva de demanda através de seguidas projeções, baseadas em simples cálculos de "regras de 3" sobre o comportamento da demanda medida (vide fig. 3.1.2). É um algoritmo síncrono, ou seja, faz uso da medição sincronizada com os pulsos enviados pela concessionária através do medidor de energia. O valor de demanda acumulada calculado é então comparado com um valor contratado para a demanda a cada instante, aproximado por um comportamento linear. O resultado de tal comparação definirá se a demanda será acima do previsto, exigindo atuação. Se abaixo, nenhuma

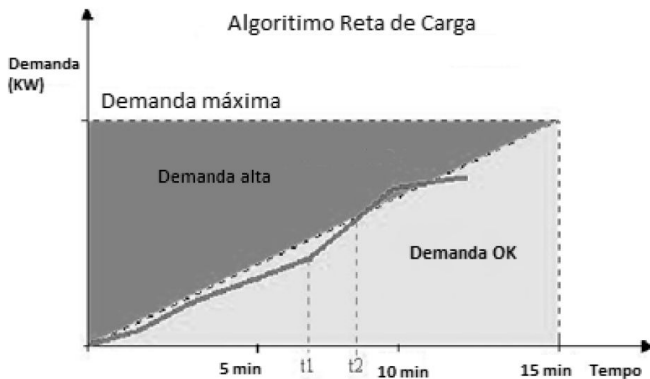


Figura 3.1.2 – Algoritmo de retas de carga (NUNES, 2012)..

atuação de controle se fará necessária (NUNES, 2012). O grande defeito de tal algoritmo traduz-se na demora em se tomar decisões.

3.1.3 Método Preditivo Adaptativo

O controle preditivo adaptativo pode ser visto como um algoritmo de retas de carga melhorado, apresentando uma maior complexidade. Permite uma otimização no controle da demanda, sendo menor a interferência no processo. Este algoritmo leva em conta, além da demanda média, também sua derivada, sendo a tendência à ultrapassagem identificada tão logo ocorra (vide fig. 3.1.3). Como as ações de controle são tomadas logo ao surgir tendência de aumento/diminuição da demanda no intervalo, a velocidade do sistema é consideravelmente aumentada (NUNES, 2012). A parte preditiva utiliza a medição sincronizada com a concessionária integrando os pulsos recebidos a partir do instante zero (chegada do sincronismo) e trabalhando sempre com a projeção da demanda dentro do intervalo de integração e com o conhecimento prévio da potência da carga.

A parte adaptativa consiste em prioridades de atuação sobre as cargas controláveis, que mudam automaticamente durante o intervalo de integração em função de uma variável elétrica ou de processo (demanda média, consumo, temperatura, pressão, vazão, etc.), ou em função, por exemplo de alguma condição imposta pelo próprio opera-

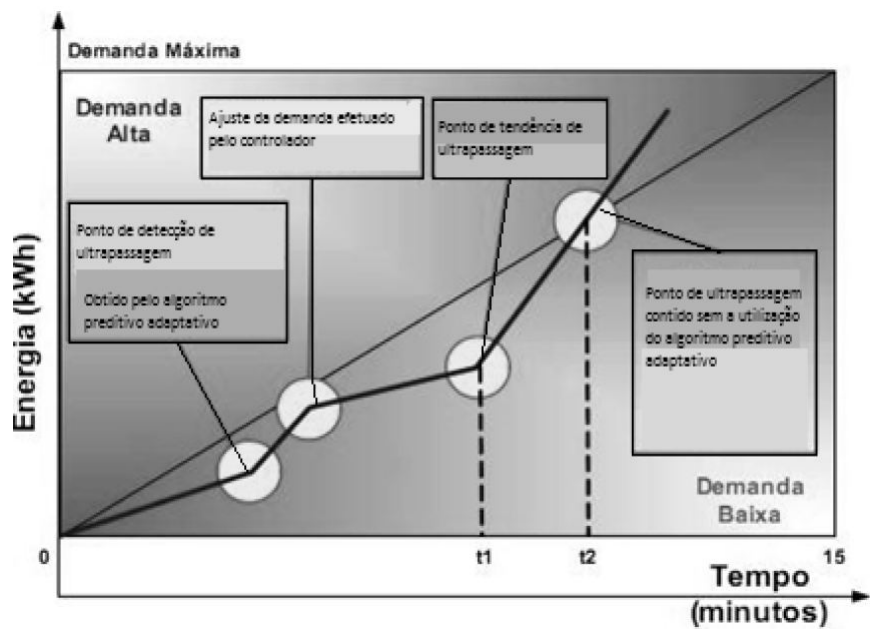


Figura 3.1.3 – Algoritmo preditivo adaptativo (NUNES, 2012).

dor.

3.2 ESTRUTURA GERAL DO ALGORITMO

Com base em uma análise da eficiência dos algoritmos acima apresentados e no conceito de potência média (utilizado na medição do consumo por parte da concessionária), buscou-se conceber um novo que herdasse apenas seus pontos positivos.

A especificação para o projeto do algoritmo de controle é basicamente a seguinte:

- O consumo deverá ser necessariamente igual ou menor do que a demanda contratada ao final de todo intervalo de integração.

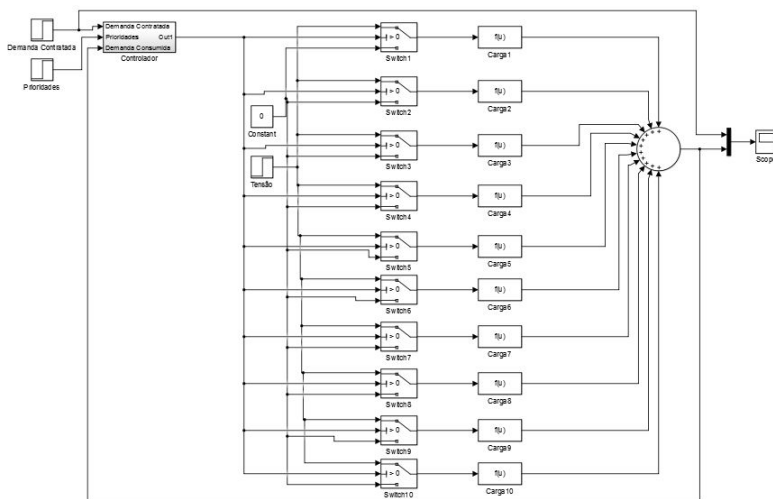


Figura 3.2.1 – Diagrama de blocos referente à topologia de controle da demanda para 10 cargas.

A fim de atender à especificação acima, a lógica de controle deve funcionar da seguinte maneira (vide fig. 3.2.1):

1. *Setpoints* de demanda contratada e prioridades;
2. o consumo instantâneo em kW é realimentado ao controlador e comparado com o setpoint;

3. Algoritmo de controle calcula quantas e quais cargas devem ser acionadas ou desligadas.

No presente projeto optou-se por dispensar a lógica referente ao algoritmo de retas de carga e sua natureza preditiva em decorrência do fato de que há cargas, como motores elétricos de grande porte, que podem influenciar consideravelmente na medição da potência consumida. Dessa maneira, cargas deste tipo seriam desligadas inutilmente.

Contudo, a abordagem cumulativa do algoritmo de janela móvel foi retomada, utilizando-se agora a integral no tempo da diferença entre o consumo e a demanda contratada:

$$\begin{aligned} E(t) &= P(t) - D \\ I(\Delta t) &= \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

Sendo:

- $P(t)$ o consumo em kW;
- D a demanda contratada em kW;
- $\Delta t = t_2 - t_1$ o intervalo de integração em segundos;
- $E(t)$ o erro em kW;
- $I(t)$ a integral do erro em um intervalo de integração em kWh.

Substituímos (3.2.1) em (2.2.1) da seguinte maneira:

$$\bar{P} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} E(t) dt}{\Delta t} + \frac{\int_{t_1}^{t_2} D dt}{\Delta t} < D$$

Sabemos que $I(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt$ e que D não depende do tempo, então temos

$$\bar{P} = \frac{I(\Delta t)}{\Delta t} + D < D \quad (3.2.2)$$

Logo, $I(\Delta t) < 0$ é condição suficiente para que o consumo médio seja menor do que a demanda contratada.

A aproximação discreta para o cálculo de $I(\Delta t)$ pelo método dos retângulos é:

$$I(\Delta t) = \frac{T_s}{3600} \sum_{i=m}^n E(iT_s) \quad (3.2.3)$$

Sendo T_s o período de amostragem em segundos, este é dividido por 3600 com o propósito de convertê-lo em horas. Como t_1 e t_2 devem ser

múltiplos inteiros de T_s , m e n são os inteiros mais próximos de $\frac{t_1}{T_s}$ e $\frac{t_2}{T_s}$, respectivamente.

Desta maneira mantemos um saldo/histórico energético durante todo o intervalo de integração, levando à seguinte análise:

- Se $I(t)$ é positivo, então o consumo médio instantâneo é maior do que a demanda contratada acumulada em kWh. Cargas serão desligadas em ordem crescente de prioridade (menos prioritária à mais prioritária) até que o consumo seja igual à demanda contratada;
- Se $I(t)$ é negativo, então o consumo médio instantâneo é menor do que a demanda contratada acumulada em kWh. Cargas serão acionadas em ordem decrescente (mais prioritária à menos prioritária) até que o consumo seja menor do que a demanda contratada. Antes de acionar uma carga, é verificado se, ao tomar tal ação o consumo irá ultrapassar a demanda contratada, levando em conta a potência instantânea da mesma;
- Se $I(t)$ é nulo, a princípio, nenhuma atuação de acionamento/-desligamento deveria ser tomada. Contudo, é utilizado o mesmo critério do caso em que $I(t)$ é negativo.

A parte adaptativa do algoritmo preditivo adaptativo também foi aproveitada, de modo que o controle possa se adaptar a mudanças do processo, que no caso resume-se à variação nas prioridades de atuação sobre as cargas. Isto impede que o controle venha a penalizar sempre as mesmas cargas (MATHEUS, 2003). Essas prioridades são abstraídas por valores inteiros em ordem crescente de 1 a n (número de cargas), por exemplo: a carga 1 recebe prioridade 5 e carga 10 prioridade 3, logo a 1 é mais prioritária. A carga 10 será bloqueada antes para o controle da demanda.

Finalmente, escreveu-se o algoritmo 1 para o controle da demanda, com base na idéia acima - a de verificar não apenas o consumo instantâneo, como também o consumo médio a cada ciclo.

Algorithm 1 Controle de Demanda de Energia Elétrica

Seja: n o número de cargas; Status um array de tamanho n , a indicar se uma dada carga está acionada ou desligada; Prior um array de tamanho n , a indicar a prioridade de cada carga; Pos um array de tamanho n , a indicar a posição de cada carga; P um array de tamanho n , a indicar a potência instantânea de uma dada carga; sortInited um comando externo, levando à reordenação das posições de acordo com as mudanças nas prioridades; t o tempo [s]; T_Int o intervalo de integração convertido em segundos; T_s o período de amostragem [s]; D a demanda contratada em grandeza de potência [kW]; C o consumo em grandeza de potência [kW]; S o valor da atuação, i.e., o saldo das potências em kW das cargas acionadas durante a varredura de desligamento e desligadas durante a de acionamento; E o erro, i.e., a diferença entre o consumo instantâneo e a demanda contratada [kW]; I a integral no tempo do erro em grandeza de energia [kWh];

```

1:  $S \leftarrow 0.0$ ;
2:  $E \leftarrow C - D$ ;
3: if  $t \geq T\_Int$  then
4:    $I \leftarrow 0.0$ ;
5:    $t \leftarrow t - 180.0$ ;
6: else
7:    $t \leftarrow t + T_s$ ;
8:    $I \leftarrow I + E \times \frac{T_s}{3600.0}$ ;
9: if NOT sortInited then
10:  for  $k = 1, 2 \dots n$  do
11:    Prior $_k \leftarrow$  valor;
12:    Pos $_k \leftarrow$  valor;
13:  ordena(Prior, Pos);
14:  sortInited  $\leftarrow$  true;
15: for  $i = 1, 2 \dots n$  do
16:
17:   $k \leftarrow Pos_i$ ;
18:  if  $I > 0.0$  then
19:    if Status $_k ==$  true then
20:      if  $S < E$  then
21:        Status $_k \leftarrow$  false;
22:         $S \leftarrow S + P_k$ ;
23:  else
24:    if Status $_k ==$  false then
25:      if  $S + P_{n-k+1} < |E|$  then
26:        Status $_k \leftarrow$  true;
27:         $S \leftarrow S + P_{n-k+1}$ ;

```

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

O algoritmo 1 executa a seguinte lógica:

- Atuação S é zerada a todo ciclo (linha 1);
- Consumo C e demanda contratada D são lidos e calcula-se o erro E (linha 2);
- Integral do erro I em um intervalo até o instante final do intervalo de integração T_{Int} , sendo zerada depois disso (linhas 3 a 8);
- É realizada a ordenação dos arrays referentes às posições e prioridades, Pos e $Prior$, respectivamente. Esse procedimento ocorre apenas quando a variável booleana `sortInited` recebe 0 através de um comando externo. A função `ordena()` faz referência a um algoritmo de ordenação, cuja descrição foge do escopo do projeto (linhas 9 a 14);
- Se a integral do erro I for positiva, o é indesejado, varre-se o array `Status` em ordem crescente de prioridades, até que o somatório das potências medidas (array P) das cargas acionadas seja suficiente para que ao desligá-las, o valor da integral se torne negativo ou nulo. Já quando a integral do erro é negativa, varre-se `Status` em ordem decrescente de prioridades, verificando, de carga em carga desligada, se ao acioná-la o valor da integral continuaria negativo ou nulo. Toma-se o módulo de I pois a atuação o valor de atuação S é sempre positivo (linhas 15 a 27).

O algoritmo `ordena()`, que pode apresentar várias soluções com complexidade computacional cada vez menor, sendo este executado apenas esporadicamente. Já a solução algorítmica para o controle da demanda de energia elétrica proposta varre, no pior dos casos, todo um array de tamanho n em um sentido ou outro a todo ciclo, quando as cargas estão todas acionadas ou todas desligadas. Isto acontece pois as seqüências de acionamento e desligamento mutuamente exclusivas em decorrência da lógica "if-else". Logo a complexidade computacional de tal algoritmo é polinomial $\Theta(n)$.

É importante deixar claro que o controlador sinaliza ao sistema a permissão da carga para operar ou seu bloqueio (intertravamento), enquanto que o operador permanece com a possibilidade de *bypass* da lógica.

4 CONTROLE SUPERVISÓRIO

O capítulo a seguir aborda o uso da *teoria de controle supervisório* (TCS) para a síntese de supervisores a impor restrições de coordenação ao algoritmo de controle de demanda e aos timers referentes à contagem de tempo desligado e tempo acionado das cargas, de modo a permitir a um operador humano de habilitar ou desabilitar o sistema (intertravamento), por questões de segurança. Por último, realiza uma breve descrição sobre a implementação do sistema em um CLP SIEMENS SIMATIC S7-1200.

4.1 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

A dinâmica de *Sistemas a Eventos Discretos* (SEDs) não está vinculada ao tempo, tampouco pode ser descrita por equações diferenciais. Sua evolução é ditada por transições geradas pela ocorrência de estímulos/ percepções do ambiente externo - *eventos*.

O SED a ser controlado, ou *planta*, em geral consiste em subsistemas. Estes, vistos isoladamente, possuem um comportamento básico original, que quando atua em conjunto aos outros subsistemas, deve ser restringido de forma a cumprir com a função coordenada a ser executada pelo sistema global (CURY, 2001). A composição dos comportamentos destes subsistemas pode ser identificada como sendo uma *planta G*.

O conjunto de restrições de coordenação caracteriza uma *especificação E*.

Para que os subsistemas atuem de forma coordenada, existe um agente de controle denominado *supervisor S*. Este supervisor *S* interage com a planta *G* em malha fechada (vide fig. 4.1.1), observando os eventos ocorridos em *G*, definindo quais, dentre os fisicamente possíveis de ocorrerem no estado atual, são estão habilitados para acontecerem a seguir. O conjunto de eventos habilitados pelo supervisor em um certo instante define uma entrada de controle, sendo esta atualizada tão logo ocorra novamente um evento, observado em *G*. Este tipo de sistema, cuja evolução é ditada pela ocorrência de eventos pode ser modelada por *Autômatos Determinísticos de Estados Finitos* (ADEFs).

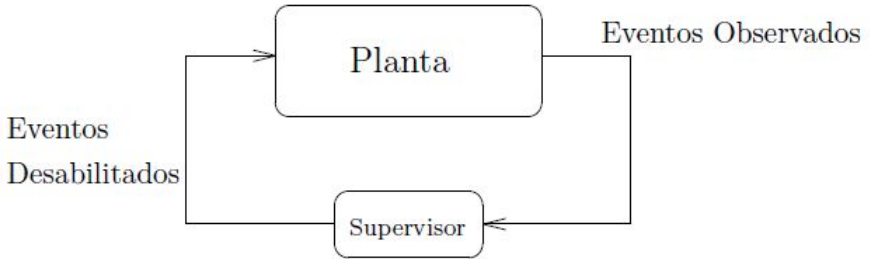


Figura 4.1.1 – SED em malha fechada (CURY, 2001).

4.1.1 Autômatos Determinísticos de Estados Finitos

Segundo (CURY, 2001), um autômato determinístico de estados finitos (ADEF) é uma quintupla $G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)$, onde:

- X é o conjunto finito de estados do autômato;
- Σ é o conjunto de símbolos (eventos);
- $f : X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função de transição, possivelmente parcial, i.e., não há necessidade da função ser definida para todo elemento de Σ em cada estado de X ;
- x_0 é o estado inicial do autômato;
- X_m é o conjunto de estados marcados ou finais $X_m \subseteq X$;

Um autômato pode ser representado graficamente como um grafo dirigido, onde os nós representam os estados e os arcos etiquetados as transições entre estes. O estado inicial é identificado através de uma seta apontando para este, enquanto que os estados finais são representados por círculos duplos (CURY, 2001).

O conjunto de eventos que afetam a planta é particionado em *controláveis* (podem ser desabilitados) e *não-controláveis* (não podem ser desabilitados):

$$\Sigma = \Sigma_c \dot{\cup} \Sigma_u$$

onde Σ_c representa o conjunto de eventos controláveis e Σ_u o de eventos não-controláveis.

Uma opção de controle $\gamma \in \Gamma$ aplicada ao sistema contém o conjunto ativo de eventos habilitados para ocorrerem no sistema:

$$\Gamma = \{\gamma \in 2^\Sigma : \gamma \supseteq \Sigma_u\}$$

onde a condição $\gamma \supseteq \Sigma_u$ indica que os eventos não-controláveis não podem ser desabilitados.

Além do mais, o supervisor pode desmarcar estados marcados da planta G , i.e., não reconhecer em malha fechada tarefas do sistema em malha aberta.

Um supervisor pode ser representado por um autômato S , definido sobre o mesmo conjunto de eventos Σ , cujas mudanças de estado são ocasionadas tão logo ocorram eventos na planta G . S atua desabilitando eventos em G que não possam ocorrer no próprio S , após uma cadeia de eventos observada. O funcionamento do sistema S/G pode ser descrito por $S \parallel G$ (produto síncrono de S e G), onde apenas as transições permitidas tanto em S quanto em G são permitidas.

4.1.2 Metodologia para a Síntese de Supervisores Ótimos

Segundo (CURY, 2001), a metodologia básica para a síntese de um supervisor pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Obtenção de um modelo para a *planta* a ser controlada;
2. Obtenção de outro modelo referente às *especificações* a serem respeitadas;
3. *Síntese* de uma lógica de controle *não-bloqueante* e ótima.

A TCS fornece algoritmos que permitem, a partir dos autômatos da planta G e da especificação R , obter um supervisor *não-bloqueante* S , a garantir que o sistema em malha fechada S/G atenda às especificações. O supervisor S é dito não-bloqueante para um autômato G se qualquer estado S/G é acessível por uma sequência de eventos partindo do estado inicial, possuir um caminho em S/G que leve a um estado marcado (SCOTTI, 2015). Isto se traduz em calcular o supervisor minimamente restritivo a inibir, conforme especificações, somente os eventos controláveis indesejados, sendo este conhecido como *supervisor ótimo*. A síntese de supervisores resume-se aos seguintes procedimentos computacionais:

1. Composição síncrona dos autômatos a fim de obter a planta G e o autômato R a modelar a especificação;

2. Cálculo do autômato S a implementar a lógica de controle.

A complexidade computacional de tais procedimentos é polinomial $\Theta(n^2)$ no produto do número de estados de G e R . Como o tempo de processamento é proporcional ao número de operações, não ocorre explosão computacional (complexidade exponencial $\Theta(2^n)$). Contudo, o número de estados de G ou R cresce exponencialmente com o número de subsistemas ou de restrições de coordenação, algo que ocasiona problemas de processamento em sistemas de grande porte. Uma solução para tal problema será abordada logo mais neste projeto: *controle modular local*.

4.1.3 Controle Modular Local

A abordagem *modular local*, permite explorar a modularidade de planta e especificações, de modo a reduzir a complexidade computacional da síntese de supervisores e o tamanho das soluções. Isto é devido à decomposição do sistema físico em subsistemas, modelados por autômatos a descrever seu comportamento (SCOTTI, 2015).

(SCOTTI, 2015) diz que uma planta G pode ser modelada por um conjunto de autômatos assíncronos (desprovidos de eventos em comum) $G_i, i = 1, 2, \dots, m$ e as especificações genéricas E por autômatos $E_j, j = 1, 2, \dots, n$, a restringir os eventos de alguma das subplantas G_i). A *composição síncrona* entre m autômatos é obtida pela evolução em paralelo dos m autômatos G_i , onde um eventos em comum a esses só pode de forma sincronizada nos m autômatos. Por outro lado, os eventos assíncronos ocorrem de forma independente em cada autômato. A composição síncrona entre dois autômatos G_1 e G_2 é denotada por

$$G_1 \parallel G_2 \quad (4.1.1)$$

Cada especificação E_j possui uma planta local G_{locj} , obtida através da composição síncrona das subplantas que compartilhem ao menos um evento com tal especificação. Então, toma-se composição síncrona de E_j e G_{locj} :

$$R_{locj} = E_j \parallel G_{locj} \quad (4.1.2)$$

sendo R_{locj} as especificações locais.

Finalmente, calcula-se os supervisores não-bloqueantes e ótimos modularmente, i.e., um supervisor Sup_{locj} para cada cada especificação local R_{locj} .

Por último, realiza-se um teste de modularidade local através da composição síncrona de todos os supervisores modulares locais, com o intuito de garantir que a ação conjunta destes seja não bloqueante. Se o autômato resultante for não-bloqueante, garante-se que a ação conjunta dos supervisores modulares locais é ótima e equivalente ao supervisor monolítico não-bloqueante e minimamente restritivo.

4.2 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

As especificações de projeto foram levantadas a partir de requisitos de tempo como estabilização de uma carga, máximo desligado e mínimo ligado. Além disso, por questões de segurança, outras especificações foram definidas a fim de garantir um *bypass* do operador humano sobre o sistema, i.e., a possibilidade de se definir em quais cargas o algoritmo de controle de demanda pode atuar. São as seguintes:

1. Ao liberar/bloquear uma dada carga, é necessário aguardar o término da contagem de um timer referente à passagem do tempo de estabilização da mesma;
2. Quando desabilitado, o controle automático de uma dada carga, não pode atuar acionando-a/desligando-a;
3. O controle para uma carga só pode ser desabilitado quando essa estiver acionada;
4. Se uma carga possuir um intervalo de tempo máximo em que pode permanecer desligada, esta deve ser imediatamente acionada quando término da contagem do timer referente;
5. Se uma carga possuir um intervalo de tempo mínimo em que deve permanecer acionada, esta só pode ser desligada quando término da contagem do timer referente.

Quanto a especificação 3, uma explicação mais detalhada sobre a mesma faz-se necessária: esta foi criada pois o sistema foi modelado de tal forma de que há um "AND" lógico entre a saída do controlador de demanda e o botão de acionamento/desligamento de uma carga, para o qual o operador tenha acesso. Como o comando do operador é sempre prioritário, a saída do algoritmo de controle tem de ser necessariamente "1", quando atuação desabilitada para uma dada carga.

Além do mais, existe um *bypass* físico pelo qual o operador pode habilitar qualquer carga manualmente, se este desejar. Isso é ilustrado

na fig.4.3.1 sob a forma de um "OU" lógico entre o sinal vindo do algoritmo de controle de demanda e outro externo.

4.3 MODELAGEM E SÍNTESE DA LÓGICA DE SUPERVISÃO

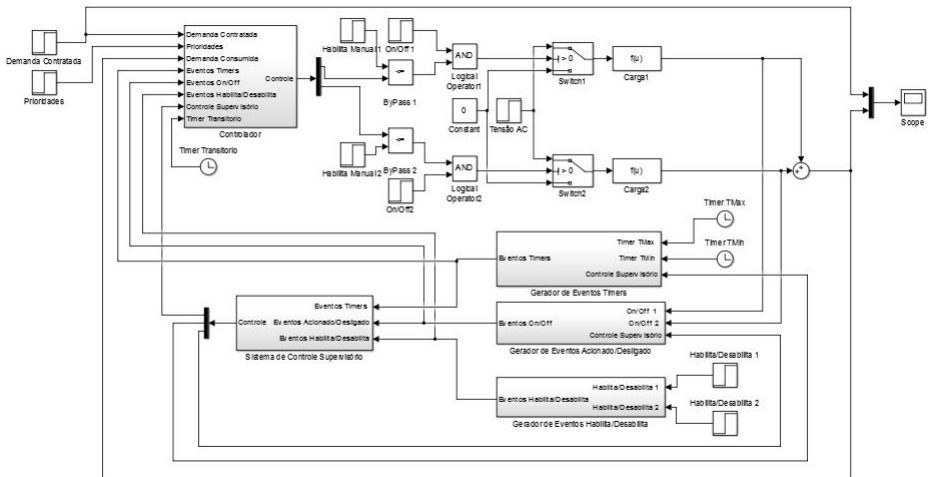


Figura 4.3.1 – Arquitetura de controle completa para duas cargas.

4.3.1 Sistema Produto

Os subsistemas a compor a planta global representam um processo contínuo de consumo de energia elétrica, em que um algoritmo faz uso da realimentação deste com o intuito de mantê-lo abaixo da demanda contratada. Contudo, tais subsistemas funcionam também como *geradores de eventos* (flags), cuja ocorrência dispara transições a serem observadas pelos supervisores em um nível mais alto de abstração (vide fig.4.3.1). Assim, os supervisores atuam habilitando e desabilitando eventos controláveis cuja sequência permite a evolução do comportamento da planta como um todo segundo as especificações desejadas, i.e., um sistema de controle supervisorio a realizar intertravamentos de segurança.

O Controlador de Demanda de Energia foi modelado segundo

a abordagem local, i.e., cada subsistema neste envolvido, individualmente, sendo os seguintes:

- Carga: Intuitivamente, refere-se a um equipamento sobre o qual consumo de energia deseja-se manter controle;
- Controle: Refere-se a habilitar ou não o controle sobre o consumo em uma dada carga;
- Timers: Executa a contagem de dois timers mutuamente exclusivos - o de tempo máximo desligado e o de tempo mínimo ligado.
- Gerenciador: Algoritmo referente ao próprio controle da demanda, cuja lógica define quantas e quais cargas devem ser acionadas/desligadas. A nível de cálculo, este recebe informações sobre eventos ocorridos em todos os subsistemas. Além disso, executa contagem de timer referente ao intervalo de transitório.

Vale observar que a nível de cálculo, o algoritmo de controle usufrui de informações sobre os eventos ocorridos além do subsistema no qual está vinculado: o *gerenciador*. Já a nível de controle supervisor, o mesmo não acontece. Desta maneira, ocorre uma troca de informações entre diferentes níveis de abstração, possibilitando a evolução conjunta das duas malhas de controle: a contínua a manter o consumo abaixo da demanda contratada e a outra a eventos discretos, a realizar intertravamentos de segurança.

As plantas *Gerenciador* e *Timers* deverão ter sua modelagem, bem como seus conjuntos de eventos omitidos na presente monografia, pois devido à não-trivialidade de sua modelagem, a empresa julgou necessário mantê-las sigilosas. Contudo, as plantas *Carga* e *Controle* serão descritas logo adiante.

4.3.1.1 Carga

O subsistema *Carga* refere-se ao comportamento de acionamento/desligamento de uma dada carga (vide fig. 4.3.2). O conjunto de Σ_{Carga} de eventos possíveis é dividido em seus subconjuntos controlável e não-controlável $\Sigma_{Carga_C} = \{\text{liberar, bloquear}\}$ e $\Sigma_{Carga_U} = \{\text{liberado, bloqueado}\}$, respectivamente. Os eventos *liberar* e *bloquear* correspondem a comandos internos do sistema, i.e., habilitados ou não conforme observação da planta pelo supervisor, com o intuito de acionar ou desligar uma dada carga. Já *liberado* e *bloqueado*, correspondem à um *feedback* sobre a alimentação ou não de uma carga.

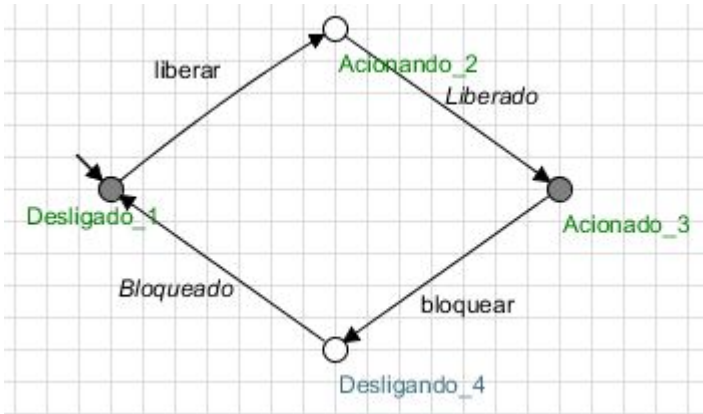


Figura 4.3.2 – Modelagem do comportamento de uma carga por ADEFs.

Assumindo que a carga inicie desligada, a sequência de transições possíveis da planta é a seguinte:

1. Uma dada carga desligada permanece no estado inicial em aguardo da ocorrência do evento controlável *liberar*, para então seguir para o estado 2;
2. Estado em que ocorre o chaveamento desligada/acionada, gerando o evento não-controlável *liberado* ao término deste, indo para o estado 3;
3. Neste estado, a carga está acionada, em aguardo de um evento controlável *bloquear*, sendo este estado marcado pois uma carga pode muito bem permanecer ligada indefinidamente.
4. Estado de chaveamento acionada/desligada, gerando o evento não-controlável *bloqueado* ao término do processo e levando a carga de volta ao estado 1.

Os eventos *acionar* e *desligar* foram convenientemente criados no modelo acima de modo a ser possível desabilitar a ocorrência de *acionado* e *desligado*, respectivamente. Pois afinal, a única maneira de se impedir a ocorrência de eventos não-controláveis é desabilitar os controláveis que os precedem.

acionado e desligado são *mutuamente exclusivos* pelo simples fato de serem gerados através dos mesmos sensores e correspondem ao sinal booleano 1 = liberado e 0 = bloqueado.

4.3.1.2 Controle

O subsistema controle (vide fig. 4.3.3) faz referência à possibilidade do operador desabilitar o envolvimento de uma dada carga na lógica de controle e conseqüentemente na atuação sobre o sistema. Desta maneira, este pode acionar/desligar a carga conforme desejar. O conjunto de $\Sigma_{Controle}$ de eventos possíveis é dividido em seus subconjuntos controlável e não-controlável $\Sigma_{Controle_C} = \{\text{desabilitar}\}$ e $\Sigma_{Controle_U} = \{\text{desabilita}, \text{habilita}\}$, respectivamente. O evento *habilitar* corresponde a outro comando interno do sistema, a ser habilitado pelo supervisor, enquanto que *desabilita* e *habilita* correspondem a eventos externos ao sistema, gerados pelo próprio operador, também mutuamente exclusivos.

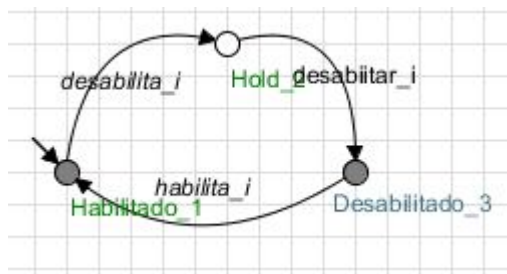


Figura 4.3.3 – Modelagem do comportamento do controle para uma carga por ADEFs.

Assumindo que o controle inicie habilitado, a seqüência de transições possíveis de tal planta é a seguinte:

1. No estado inicial o controle encontra-se habilitado para uma dada carga, aguardando o evento *desabilita*, gerado pelo próprio operador, levando ao estado 2. O estado é marcado pois o controle para uma certa carga pode permanecer desabilitado indefinidamente;
2. Reconhecida a ocorrência do evento *desabilita*, o supervisor habilita a ocorrência do evento controlável *desabilitar*;

- Aguarda-se a ocorrência de *habilita*, voltando ao estado 1. Este estado também é marcado, pois o controle para uma dada carga também pode permanecer habilitado indefinidamente.

Novamente, o evento *desabilitar* foi criado com o propósito de facilitar a inibição do *desabilita*, não-controlável.

4.3.2 Especificações

A modelagem das especificações nada mais é do que uma abstração em ADEFs das especificações de projeto acima citadas. O par 2 – 3 foi modelado de forma conjunta.

Novamente, devido ao sigilo imposto pela empresa, será possível expor e descrever o autômato correspondente ao par de especificações 2 – 3, omitindo os modelos referentes ao restante delas.

4.3.3 Modelagem das Especificações 2 e 3 - E_2

Conforme anteriormente citado as especificações de projeto 2 e 3 foram traduzidas, devido à conexão entre estas e por trabalharem com o mesmo conjunto de eventos, em um único autômato. São estas:

- Quando desabilitado, o controle automático de uma dada carga, não pode atuar acionando-a/desligando-a;
- Uma carga só pode ser desabilitada quando estiver acionada;

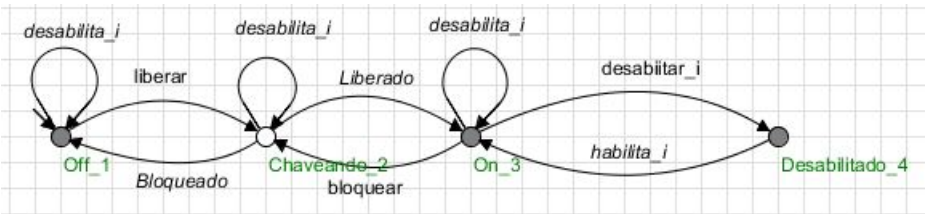


Figura 4.3.4 – Modelagem de E_2 por ADEFs.

A especificação conjunta, à qual nos referiremos como E_2 (vide fig. 4.3.4) envolve duas plantas do sistema produto: *Carga* e *Controle*. Como essas duas não possuem eventos em comum, temos que $\Sigma_{E_2} =$

$\Sigma_{\text{Carga}} \cup \Sigma_{\text{Controle}}$, i.e., o conjunto de eventos possíveis de E_2 nada mais é do que a união dos conjuntos de eventos possíveis de Carga e Controle.

As transições do autômato ilustrado na fig. (a se acrescentar) podem ser descritas da seguinte maneira (novamente, assumindo-se que a carga começa desligada e seu controle habilitado):

1. No estado inicial, uma carga encontra-se desligada e o controle da mesma habilitado. O evento *desabilita*, como é não-controlável, pode ocorrer livremente. Ao ocorrer o evento controlável *acionar* da mesma, há um transição para o estado 2;
2. Esse estado corresponde ao chaveamento aciona/desliga e vice-versa. Assim, aguarda-se pelos eventos não-controláveis *acionado* ou *desligado*, levando aos estados 1 e 3, respectivamente. Aqui o evento *desabilita* também pode ocorrer livremente;
3. Neste estado, a carga encontra-se acionada e seu controle habilitado. Ao ocorrer o evento controlável *desabilitar*, correspondente a uma resposta do sistema ao evento *desabilita* (gerado pelo operador), há uma transição para o estado 4. Aqui novamente *desabilita* pode ocorrer livremente;
4. Neste estado o único evento possível de ocorrer é o não-controlável *habilita* (gerado pelo operador), que em decorrência da planta controle, só ocorre após um *desabilitar*, de modo a atender à especificação 3 de projeto. Aqui tanto o evento *desligar* quanto *acionar* estão desabilitados, com o intuito de atender à especificação 2 de projeto.

4.3.4 Síntese dos Supervisores

Conforme exposto ao longo do capítulo, obtemos as plantas G_1 , G_2 (fig. 4.3.5) e G_3 pela eq. (4.1.1):

$$\begin{aligned}
 G_1 &= \text{Carga} \parallel \text{Gerenciador} \\
 G_2 &= \text{Carga} \parallel \text{Controle} \\
 G_3 &= \text{Carga} \parallel \text{Tempos}
 \end{aligned}
 \tag{4.3.1a}$$

As plantas " G_i " resultam da composição síncrona dos subsistemas afetados por cada uma das especificações " E_i " modeladas.

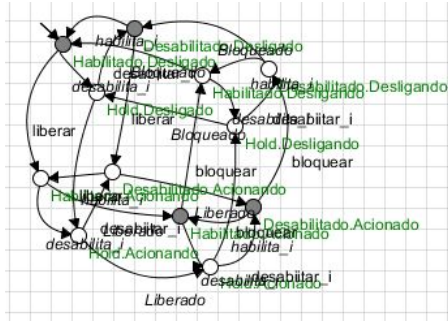


Figura 4.3.5 – Planta G_2 .

Agora obtemos os comportamentos das plantas restringidos pelas especificações pela eq.(4.1.2), denotados por R_1 , R_2 (fig. 4.3.6) e R_3 :

$$R_1 = E1 \parallel G1$$

$$R_2 = E2 \parallel G2$$

$$R_3 = E3 \parallel G3$$

(4.3.2a)



Figura 4.3.6 – R_2 (Comportamento de G_2 restrito por E_2).

Finalmente calculamos os supervisores $S1$, $S2$ (fig.4.3.7) e $S3$. Como manualmente seria um trabalho bastante dispendioso, fazemos uso da ferramenta *Supremica*.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \text{supC}(E1, G1) \\
 S_2 &= \text{supC}(E2, G2) \\
 S_3 &= \text{supC}(E3, G3)
 \end{aligned}
 \tag{4.3.3a}$$

Neste caso, os supervisores são idênticos às restrições devido à ausência de "maus estados" (bloqueios).

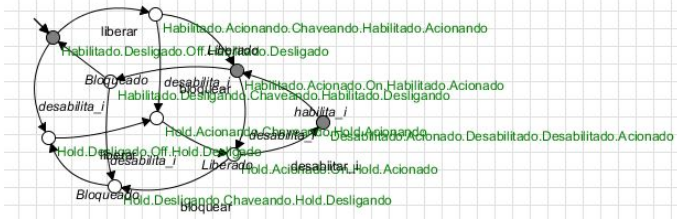


Figura 4.3.7 – Supervisor 2 a restringir o comportamento da planta G_2 conforme desejado.

É importante enfatizar de que o sistema foi modelado para uma carga apenas de maneira a facilitar a concepção do próprio modelo e a síntese dos supervisores, evitando o risco de uma explosão combinatória de estados. O sistema como um todo (subsistemas, as especificações e conseqüentemente os supervisores) será replicado n vezes tal qual o números de cargas com a qual deseja-se trabalhar.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO EM CLP

Tanto o código do algoritmo de controle de demanda de energia quanto o controle supervisorório foram implementados em *texto estruturado*. O texto estruturado é uma linguagem de programação procedural, i.e., faz uso de sentenças para definir a execução de uma lógica.

Graças ao *Totally Integrated Automation Portal* (TIA Portal), plataforma integrada para implementação de soluções de automação da SIEMENS (SIEMENS, 2015) foi possível configurar com facilidade hardware e conexões de rede através de operações de "clique e arrastar" e posteriormente, implementar a lógica de controle. Tanto os supervisores, quanto o algoritmo de controle da demanda foram implemen-

tados no mesmo código, por ordem da Greylogix, que tem a intenção de vender o produto como um único *function block*. Function Blocks (FBs)(fig.4.4.1) são funções tratadas como classes de objetos, logo tornam possível a utilização de múltiplas instâncias do mesmo bloco. os dados com os quais um FB está trabalhando são salvos em uma partição de memória permanente chamada *instance data block* (DB).

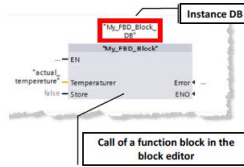


Figura 4.4.1 – Instância de um FB.

4.4.1 Geração do Código

Primeiramente, utilizou-se a ferramenta *IDES2ST* (KLINGE, 2007). O *IDES2ST* recebe arquivos referentes às subplantas, especificações, plantas locais (afetadas pelas respectivas especificações) e supervisores no formato .xmd e retorna máquinas de estado em texto estruturado (vide fig.4.4.2).

As variáveis referentes ao estados do supervisor 2 e subsistemas "Carga" são todas codificadas por inteiros, pois ao criar os respectivos autômatos no *IDES3* é acrescentado um label decimal a cada estado.

Há duas variáveis associadas aos eventos não-controláveis:

- As com prefixo "Ae_", vinculadas à percepção da ocorrência dos eventos não-controláveis pela planta;
- As com prefixo "e_", vinculadas à observação pelo supervisor da transição disparada na planta após a ocorrência de tais eventos.

O gerador de códigos cria dois FBs diferentes para os supervisores e o sistema produto, o que não é o intuito da empresa, que planeja comercializar o programa de controle da demanda em um único. Tal alteração se faz necessária.

Há também duas variáveis associadas aos eventos controláveis:

- As com prefixo "de_", que indicam estes eventos controláveis estão

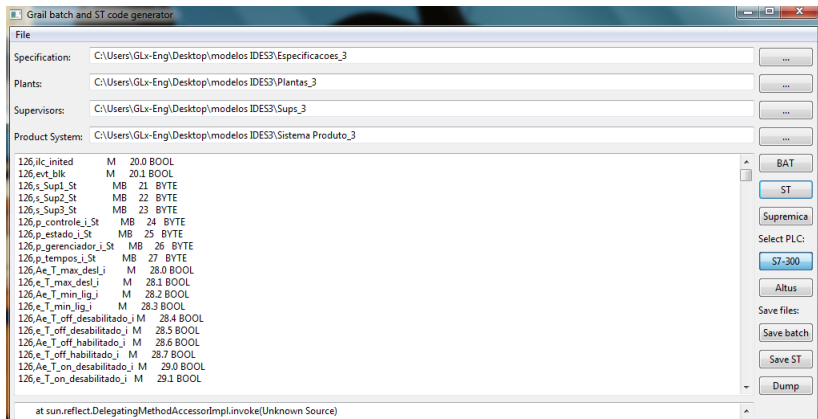


Figura 4.4.2 – Geração de código no IDES2ST.

desabilitados pelo supervisor (1 para desabilitado e 0 para habilitado);

- As com prefixo "e_", que indicam a ocorrência de tais eventos controláveis na planta, quando habilitados pelo supervisor.

As variáveis "evt_blk" e "ilc_initied" serão vistas mais adiante.

Cada supervisor efetua uma transição apenas por ciclo graças à variável "evt_blk". Tal variável recebe "0" no início de cada ciclo e "1" ao disparar uma transição.

```
(* -----
(* Supervisors
*)
(* -----
(*Supervisors: execution of transitions (structure is implicit here)
*)

(*s_Sup2:*)
evt_blk := 0;
IF ((NOT evt_blk) AND (s_Sup2_St=2) AND e_i_bloqueado) THEN
    evt_blk := 1;
    s_Sup2_St:=1;
END_IF;
```

Ao final do código é definido em quais estados do supervisor 2 são desabilitados os eventos controláveis.

```
(* ----- *)
(*Disabled events:
*)
(*e_bloquear_i:*)
De_bloquear_i := 0;
IF ((s_Sup2_St=1) OR (s_Sup2_St=2) OR (s_Sup2_St=4))
THEN
    De_bloquear_i := 1;
END_IF;
```

Os estados de todas as subplantas são inicializados, bem como as ocorrências de todos os eventos não-controláveis, de modo a atualizar sua observação pelos supervisores. Então, é executada uma transição, decorrente da ocorrência de um evento não-controlável.

```
(*uncontrollable events of p_controle_i:*)
IF ((NOT evt_blk) AND (p_controle_i_St=1) AND Ae_desabilita_i) THEN
    e_desabilita_i := 1;
    Ae_desabilita_i := 0;
    evt_blk := 1;
    p_controle_i_St:=2;
    LOGCODE := 8;
END_IF;
```

Finalmente, os eventos controláveis são inicializados, de modo a serem habilitados/desabilitados pelos supervisores no próximo ciclo. Durante as transições, um evento controlável ocorrerá somente se habilitado (ou não desabilitado) pelos supervisores.

```
(*controllable events of p_controle_i:*)
IF ((NOT evt_blk) AND (p_controle_i_St=2) AND (NOT De_desabilita_i)) THEN
    e_desabilita_i := 1;
    evt_blk := 1;
    p_controle_i_St:=3;
    LOGCODE := 10;
END_IF;
```

É importante enfatizar que ocorre apenas uma transição em todo o sistema produto por ciclo, i.e., apenas uma das subplantas passará por uma transição. Isto decorre da inicialização da variável "evt_blk" uma única vez no início do código referente ao sistema produto.

O algoritmo 1 é executado em um determinado estado da subplanta *gerenciador*, pelo simples fato de que tal subplanta nada mais é do que uma abstração em autômatos da lógica executada pela heurística concebida. O cálculo de erro-integral do erro é realizado livremente, fora da máquina de estados por ser algo independente desta e responsável por gerar eventos não-controláveis, responsáveis pela evolução

da planta. A ordenação da hierarquia das cargas também independe da máquina de estados, ocorrendo somente quando solicitado pelo operador. Aqui também é executada a contagem do tempo de estabilização. Maiores detalhes são omitidos em decorrência do sigilo imposto pela Greylogix.

```
IF p_gerenciador.i_St=.. THEN
    //executa algoritmo 1
ELSIF p_gerenciador.i_St=.. THEN
    //conta tempo de estabilização
END_IF;
```

A contagem de tempo desligado e tempo ligado dá-se em um determinado estado da subplanta *tempos*, de maneira análoga à subplanta *gerenciador*, i.e., a própria subplanta abstrai em autômatos o comportamento destes timers.

```
IF p_tempos.i_St=.. THEN
    //conta tempo desligado
ELSIF p_gerenciador.i_St=.. THEN
    //conta tempo ligado
END_IF;
```


5 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O capítulo a seguir descreve a construção de um protótipo para fim demonstrativo, no qual 6 cargas reais e 4 cargas simuladas têm seu consumo total médio controlado pelo algoritmo projetado, sendo este mostrado em tempo de execução na tela de um sistema SCADA.

5.1 MONTAGEM DA BANCADA



Figura 5.1.1 – CLP SIMATIC S7-1200 e relés encaixáveis devidamente montados sobre um trilho DIN.

A fim de montar uma bancada (vide fig.5.1.1 e 5.1.2) para a realização de testes foram necessários os seguintes itens:

- 1^a tábua de compensado de dimensões 30x60 cm;
- 1 trilho DIN;
- 1^a fonte 24V DC;
- 1 CLP SIEMENS SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/RLY);
- 10 relés encaixáveis 3TX7014-1BM DC 24V;



Figura 5.1.2 – Conjunto de cargas físicas.

- 3 lâmpadas incandescentes de 60 W;
- 1_a lâmpada fluorescente de 11W;
- 1_a lâmpada fluorescente de 20W;
- 6 receptáculos a suportar uma potência máxima de 60 W cada.

Fixou-se o CLP e os relés encaixáveis sobre o trilho DIN, de modo a poder fixá-los em uma parede e assim facilitar a visualização dos leds indicadores. As lâmpadas foram encaixadas aos receptáculos, que por sua vez foram fixados à tabua de compensado, a ser mantida em cima de uma mesa.

5.2 CIRCUITO DE ACIONAMENTO

O CLP e os relés (fig.5.1.1), bem como as lâmpadas (cargas) (fig.5.1.2) foram montados conforme circuito ilustrado na fig.5.2.1, o CLP SIMATIC S7-1200 é alimentado com uma tensão de 24V DC (diferencial), sendo que suas entradas/saídas digitais também trabalham com sinais de tensão de 0 a 24V DC. É importante salientar que cada trilha (byte) de pinos, tanto de entrada quanto de saída tem de ser alimentado para que possa funcionar.

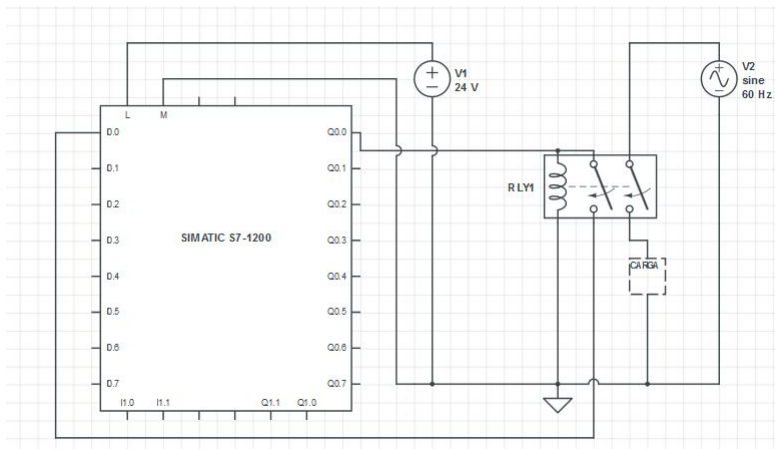


Figura 5.2.1 – Esquema elétrico de acionamento de uma única carga.

Relés de contato duplo são utilizados para as seguintes finalidades:

- Atuar como chave de modo a alimentar as cargas com a fonte de 220V-60Hz da rede elétrica;
- Realimentar um sinal de tensão 0-24V DC à respectiva entrada digital, de modo que o sistema possua a informação de que uma dada carga está acionada ou não.

Uma limitação relevante do protótipo está vinculada à medição da potência instantânea das cargas. Devido ao alto custo de inversores de potência e multimedidores de energia, que fornecem tal medida, utilizou-se os valores nominais de cada carga para o cálculo do consumo. Logo, a dinâmica do consumo é apenas simulada, enquanto que a atuação no chaveamento é realizada em cargas físicas.

5.3 SISTEMA SCADA

Sistemas de *Supervisory control and data acquisition* (SCADA) (fig.5.3.1) possuem, dentre diversas funções:

- Monitorar, organizar e processar dados de processo vindos de CLPs e terminais remotos;

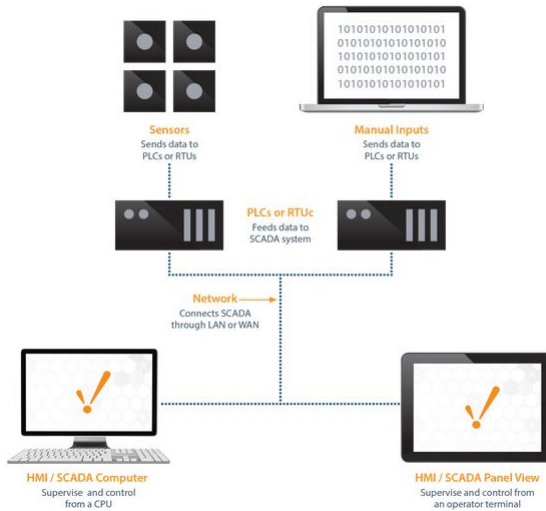


Figura 5.3.1 – Arquitetura básica de um sistema SCADA (INDUCTIVE AUTOMATION, 2015).

- Interagir com máquinas e dispositivos como válvulas, bombas e motores, interconectados por uma IHM (interface homem-máquina), de modo a possibilitar a modificação de setpoints e quaisquer outras variáveis de atuação;
- Gravar eventos em arquivos de log.

Tais funções permitem aos operadores de evitar desperdícios e aumentar a eficiência de processos (INDUCTIVE AUTOMATION, 2015).

O layout do sistema SCADA empregado neste projeto consiste basicamente de duas telas, entre as quais é possível se chavear pelo pressionamento de um botão:

1. Monitoramento do consumo (fig.5.3.2) por um gráfico de consumo vs tempo, no qual é possível editar parâmetros como tempo de amostragem, demanda contratada e tempo de transitório;
2. Edição dos parâmetros individuais de cada carga (fig.5.3.3) como habilitação do respectivo controle, prioridade, tempo máximo desligada e tempo mínimo acionada.

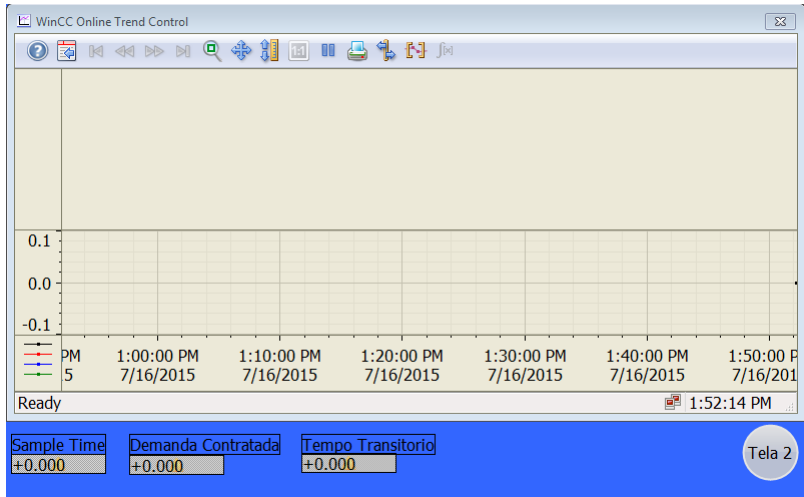


Figura 5.3.2 – Tela de Monitoramento.

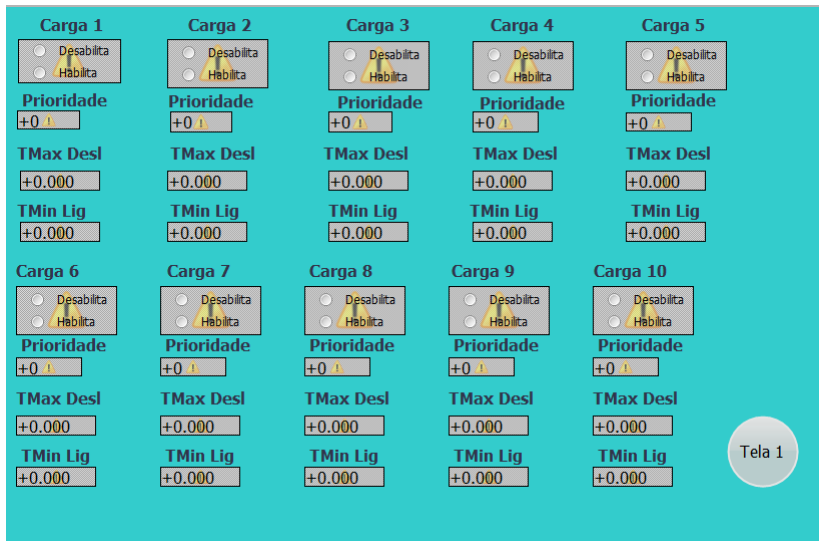


Figura 5.3.3 – Tela de edição de parâmetros individuais das cargas.

6 RESULTADOS

O capítulo a seguir expõe os resultados de testes com o intuito de se inferir sobre o desempenho do sistema projetado, tanto sob condições normais de operação quanto adversas (piores casos).

6.1 TESTES

Buscou-se levantar diversos cenários que possibilitassem verificar o desempenho do sistema como um todo quanto ao objetivo principal, que é o de manter o consumo abaixo da demanda contratada e os de segurança: respeitar o fim da contagem dos timers de tempo desligada e acionada, quando for o caso; bloquear o controle para uma carga apenas quando acionada; impedir ao algoritmo de controle de chavear cargas desabilitadas para controle. Foram estes:

1. Variar o setpoint de demanda contratada durante o intervalo de integração, em que todas as cargas desprovidas de tempos máximos desligada e mínimo acionada;
2. Desabilitar o controle de demanda para uma dada carga (que estará acionada) pelo supervisor, devendo o algoritmo de controle compensar tal aumento no consumo desligando outras cargas;
3. Acionar manualmente uma carga e o sistema ser capaz de compensar, se o consumo ultrapassar a demanda, tal ação desligando outra cargas;
4. Variar o setpoint de demanda contratada durante o intervalo de integração, desta vez com as cargas possuindo atributos de tempo máximo desligadas e tempo mínimo acionadas.
5. Definir o setpoint de demanda como sendo 0 e o sistema de controle supervisorio garantir que os atributos de tempo sejam respeitados.

Para realizar tais testes fez-se necessário definir alguns parâmetros:

- Intervalo de integração de 3 minutos;
- Tempo de transitório assumido pelo algoritmo de controle como sendo de 20 segundos;

- Potências nominais em W e suas prioridades, respectivamente:

1. 200 - 10;
2. 400 - 9;
3. 600 - 8;
4. 800 - 7;
5. 1000 - 6;
6. 60 - 5;
7. 60 - 4;
8. 60 - 3;
9. 11 - 2 (defeito no pino);
10. 20 - 1.

A fim de avaliar o desempenho do controlador sobre cargas dinâmicas (que apresentem transitório), as cargas 1, 2, 3, 4 e 5 (as mais prioritárias) tiveram seu comportamento temporal simulado através de um sistema linear de 1ª ordem (fig.6.1.1), descrito pela equação

$$P(t) = P_N(1 - e^{-\tau t}) \quad (6.1.1)$$

sendo P_N a potência nominal de uma carga, e τ a constante de tempo (um intervalo de tempo de 3τ é suficiente para alcançar aproximadamente 95 % do valor de regime permanente P_N).

Sendo escolhido um tempo de acomodação 15 segundos, $\tau = \frac{15}{3} = 5$ segundos.

O restante das cargas (6 a 10), escolhidas como sendo as menos prioritárias, correspondem às lâmpadas. Estas são cargas puramente resistivas, ou seja, desprovidas de dinâmica.

6.2 CENÁRIO 1 - SEM ATRIBUTOS DE TEMPOS

Na situação 1, variou-se a demanda contratada ao longo do tempo de 2500 para 1000 e finalmente para 3300 W (o somatório das potências nominais é 3260 W) com o propósito de inferir sobre desempenho do algoritmo de controle em manter o consumo médio abaixo da demanda. Este é o caso mais simples, em que nenhuma das cargas apresenta atributos de tempo máximo desligada e tempo mínimo acionada.

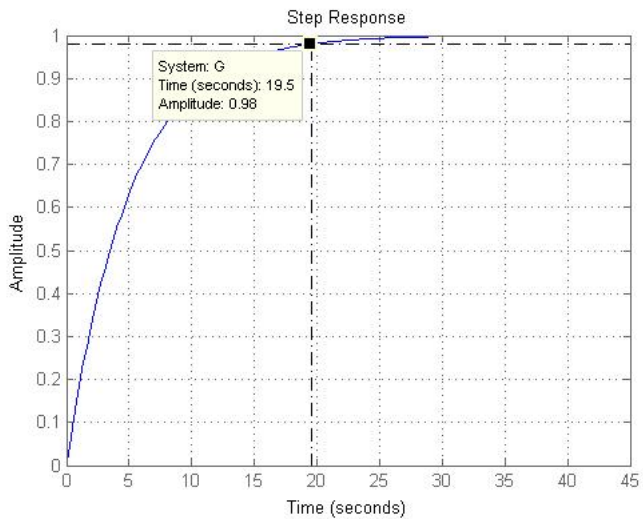


Figura 6.1.1 – resposta temporal de $P(t)$.

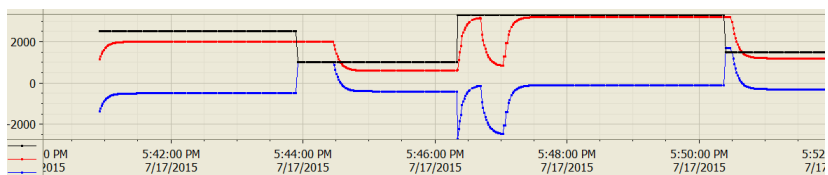


Figura 6.2.1 – Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o primeiro cenário.

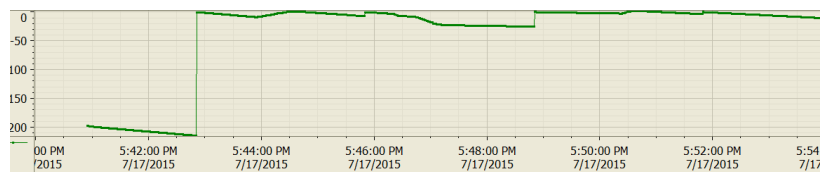


Figura 6.2.2 – Integral do erro em função do tempo para o primeiro cenário.

A medição do consumo médio realizado pela concessionária corresponde a uma descontinuidade no gráfico de integral do erro vs tempo (fig. 6.2.1), sendo que essa medida foi tomada 4 vezes, pois um tempo maior do que 4 intervalos de integração se passou. Em todos estes 4 é possível observar que no instante anterior à medição, a integral do erro é negativa, logo o consumo médio é menor do que a demanda contratada, logo condição descrita pela eq.(3.2.2) é garantida.

6.3 CENÁRIO 2 - CONTROLE DESABILITADO PARA UMA CARGA

Aqui realizamos um teste de desempenho do sistema quando o controle da carga 1 é desabilitado, constando em funcionamento. O setpoint de demanda é mantido fixo em 350 W.

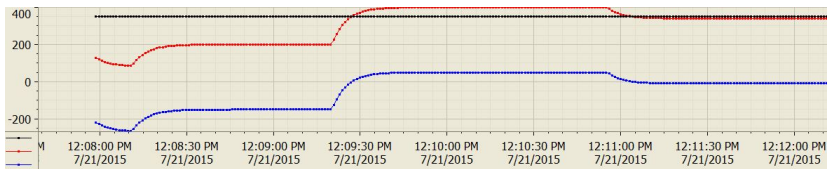


Figura 6.3.1 – Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o segundo cenário.

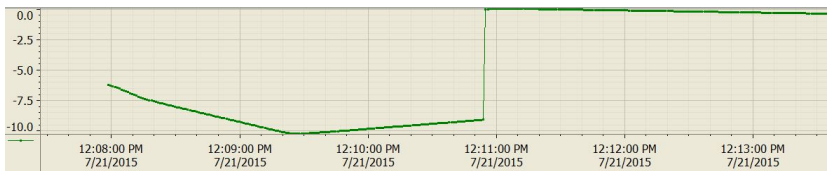


Figura 6.3.2 – Integral do erro em função do tempo para o segundo cenário.

O consumo começa em 200 W. Ao contar desabilitar a carga 1, o sistema já não atua sobre esta, apenas contabilizando seu contributo de potência. Logo, ocorre um aumento no consumo para 400 no consumo, a ultrapassar a demanda contratada (vide fig.6.3.1). Somente quando a integral do erro passou a ser positiva, logo após a descontinuidade referente à medição pela concessionária (vide fig.6.3.2), atuou-se sobre

o restante das cargas em ordem crescente de prioridade, a fim reestabelecer o consumo dentro de seu limite, em 350 W.

6.4 CENÁRIO 3 - CARGA ACIONADA MANUALMENTE POR UM OPERADOR

Em tal situação verifica-se a consequência de um acionamento manual da carga 1, através de um interruptor, por um operador. O setpoint de demanda é o mesmo do cenário 2 - 350 W.

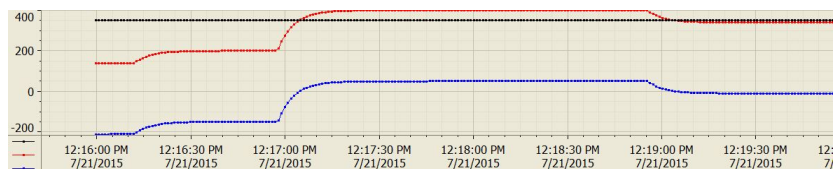


Figura 6.4.1 – Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o terceiro cenário.

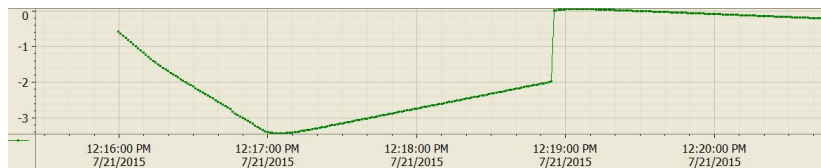


Figura 6.4.2 – Integral do erro em função do tempo para o terceiro cenário.

Novamente, ao ligar a carga 1, ocorreu um aumento do consumo para 400 W (fig.6.4.1). Tão logo a integral do erro adquiriu valor positivo logo após a descontinuidade decorrente da medição pela concessionária, o sistema desligou outras cargas dentre as menos prioritárias de modo a reduzir o consumo para um valor abaixo do setpoint de demanda contratada.

6.5 CENÁRIO 4 - COM ATRIBUTOS DE TEMPOS

Na situação 4 repetiu-se o procedimento da situação 1, variando a demanda contratada na sequência 2500 - 1000 - 500 - 3300 W (fig.6.5.1). Contudo, desta vez, as cargas 1, 2, 3 4 e 5 (as mais prioritárias) receberam atributos de tempo máximo desligada e tempo mínimo acionada idênticos e iguais a 10 e 20 segundos, respectivamente.

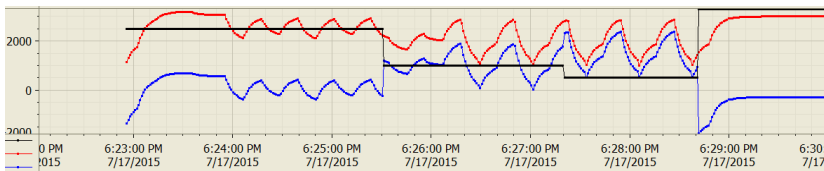


Figura 6.5.1 – Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o quarto cenário.

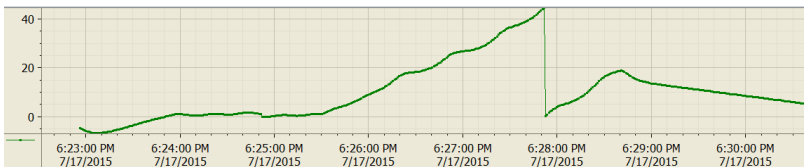


Figura 6.5.2 – Integral do erro em função do tempo para o quarto cenário.

Aqui, o consumo médio foi medido apenas 2 vezes (vide fig. 6.5.2), sendo que na segunda medição o consumo médio encontrava-se bem acima da demanda contratada (em torno de 50 W).

É possível notar pela fig.6.5.1 que, reduzindo o setpoint de demanda, o comportamento do consumo tornou-se cada vez mais oscilatório em torno deste setpoint. Isto ocorreu pois os atributos de tempo máximo desligado e mínimo ligado levam o algoritmo de controle, que deveria manter as cargas menos prioritárias desligadas, a acioná-las de modo a respeitar o tempo máximo desligado de cada uma delas.

6.6 CENÁRIO 5 - DEMANDA NULA

Na seguinte situação, o consumo médio foi medido apenas uma vez, estando este acima da demanda contratada (vide fig.6.6.2). Contudo, o setpoint de demanda foi definido como sendo 0 exatamente com o intuito de forçar o chaveamento das cinco cargas mais prioritárias, sendo estas as que possuem atributos de tempo máximo desligada e mínimo acionada idênticos e iguais a 10 e 20 segundos, respectivamente.

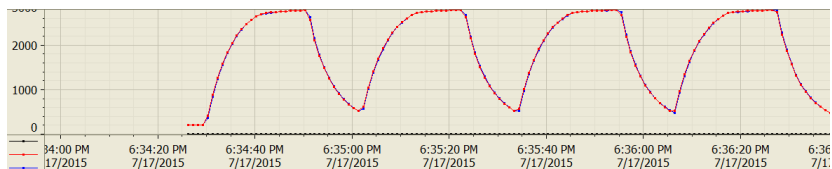


Figura 6.6.1 – Demanda (preto), consumo (vermelho) e erro (azul) em função do tempo para o quinto cenário.

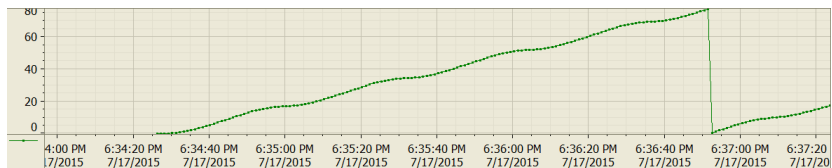


Figura 6.6.2 – Integral do erro em função do tempo para o quinto cenário.

É nítido na fig.6.6.1, pelo comportamento oscilatório de período 30 segundos (20 em processo de acionamento e 10 em desligamento) que os atributos de tempo foram respeitados.

7 CONCLUSÃO

O objetivo geral do projeto - o de desenvolver um controlador de demanda de baixo custo - foi atingido. Os custos para o seu desenvolvimento limitaram-se a itens razoavelmente baratos como lâmpadas e receptáculos, já que o CLP e os relés encaixáveis foram fornecidos pela própria Greylogix. O produto, sob forma de biblioteca para CLP SIMATIC S7-1200 já despertou o interesse de alguns clientes, atraídos pela relação custo/benefício de tal solução. Quanto aos objetivos específicos, os testes funcionais mostraram que o algoritmo de controle concebido garante que o consumo médio não ultrapasse a demanda contratada a todo fim de intervalo de integração em todos os cenários, menos o quarto: o que todas as cargas apresentam atributos de tempos máximo desligado e mínimo ligado. O quinto cenário provou que, em ausência de demanda, os supervisores forçam o chaveamento periódico das cargas de modo a respeitar as especificações de tempo. O segundo e terceiro, duas situações análogas em que um operador toma o controle de uma carga para si, mostraram que os supervisores impedem, conforme projetado, ao algoritmo de controle de atuar sobre uma carga desabilitada, forçando-o a compensar o consumo fixo destas atuando sobre as restantes.

O uso de estratégias para o controle da demanda de energia elétrica representam uma válida alternativa para reduzir custos operacionais de uma empresa justamente pelo fato da possibilidade de serem embarcadas em CLPs, aparelhos robustos desenvolvidos para trabalhar ininterruptamente durante anos, dispensando manutenção.

O ato de chavear cargas de modo a manter o consumo dentro de um limite resume-se a um problema de escalabilidade de processos, cujas soluções matematicamente formais podem ser ótimas, porém seu cálculo extremamente dispendioso computacionalmente. Heurísticas, como a apresentada neste projeto, possuem como grande vantagem a intuitividade de sua concepção. A desvantagem está na necessidade de diversos testes para sua validação. Os testes mostraram que todas as especificações de projeto foram atendidas, contudo o controle torna-se ineficaz para a configuração de cargas com seus respectivos tempos máximo desligado e mínimo ligado, não permitindo uma potência média consumida inferior à demanda contratada (teste de absurdo).

O formalismo presente na teoria de controle supervisorio permite validar lógicas de intertravamento antes mesmo da implementação das mesmas. A possibilidade de uma abordagem local de projeto simpli-

ficou a modelagem de planta e especificações, bem como a posterior síntese dos supervisores por envolver uma única carga genérica, solução expandida com sucesso para n cargas. Em decorrência de tal simplicidade, o número de estados e eventos possíveis das máquinas de estados implementadas em um CLP é menor, logo o processamento torna-se consideravelmente mais rápido e menos memória é alocada para o armazenamento de variáveis.

Métodos formais da literatura como *otimização sob restrições não-lineares* e *controle por modos deslizantes* para definir o chaveamento das cargas, possivelmente melhorando o desempenho do controlador de demanda, justamente por possibilitarem o cálculo de um sinal de controle digital (atuação discreta).

Além do mais, futuramente, estuda-se a possibilidade de se controlar também o fator de potência, pois também é passível de muitas severas.

REFERÊNCIAS

ARAGÓN, C. S. *IDENTIFICAÇÃO, AVALIAÇÃO E GESTÃO DE RISCO DE INVESTIMENTOS EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2011.

BRAGA, N. C. Tudo sobre relés. *Revista Saber Eletrônica*, n. 169-1998, 1998.

CUNHA, A. E. C. da. *Controladores Lógicos Programáveis*. [S.l.], 2005. Accessed 2015-07-11. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/aecc/Automacao>>.

CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. V *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (Minicurso)*, 2001.

INDUCTIVE AUTOMATION. *What is SCADA*. [S.l.], 2015. Accessed 2015-07-24. Disponível em: <<https://inductiveautomation.com/what-is-scada>>.

KLINGE, S. Supervisory control of a manufacturing cell: modeling and implementation. *CEP*, v. 88040, p. 900, 2007.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. *What's Energy Efficiency?* [S.l.], 2015. Accessed 2015-07-10. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/ee/ee-1.html>>.

MATHEUS, H. *Controladores de Demanda*. 10 2003. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Mato Grosso.

NETTO, P. L. F. *Motores Elétricos*. [S.l.], 1999. Accessed 2015-07-10. Disponível em: <<http://feiradeciencias.com.br>>.

NUNES, A. C. *DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL*. 2012. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

OZUR, F. S.; PEREIRA, T. H.; CORREA, J. D. Controle de demanda de energia elétrica. *e-Xacta*, v. 4, n. 3, 2012.

SCOTTI, W. A. F. *METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO INTEGRANDO CLP, SCADA E ROTEAMENTO DE TAREFAS*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SIEMENS. *Portal de Automação Totalmente Integrada*. [S.l.], 2015. Accessed 2015-07-16. Disponível em: <<http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/tia-portal/portal-automacao-tia>>.